

# 一种适合微条气体室探测器的理想衬底材料\*

张明龙 夏义本 王林军 张伟丽

(上海大学材料科学与工程学院 上海 201800)

**摘要** 微条气体室(Micro-strip Gas Chamber, MSGC)探测器最严重的问题是电荷积累效应,通过选择合适的衬底材料可以有效的避免.为此,D263玻璃上沉积类金刚石(Diamond-like Carbon, DLC)膜来进行表面改性,从而制备DLC膜/D263玻璃双层结构作为MSGC衬底.拉曼光谱说明DLC膜是由 $sp^3$ ( $\sigma$ 键)和 $sp^2$ ( $\pi$ 键)杂化碳原子组成,属于电子导电型材料,并且沉积出的是一种高质量的DLC膜;I-V曲线表明DLC膜改性后的样品具有非常稳定和理想的电阻率,其值在 $10^9$ — $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ 间;C-F曲线显示改性后样品具有小而稳定的电容.DLC膜/D263玻璃的优良性能正是MSGC衬底的最佳要求,这种新型材料用作衬底将有效克服电荷积累效应和衬底不稳定性.

**关键词** 微条气体室探测器 类金刚石膜 电荷积累效应 电子导电型材料

## 1 引言

1968年,G. Charpak<sup>[1]</sup>首先发明多丝正比室(Multi-wire Proportional Chamber, MWPC),使气体探测器发生革命性进展,进入位置灵敏探测器时代,为此,G. Charpak获得了诺贝尔物理奖.1988年,A. Oed<sup>[2]</sup>在MWPC的基础上,提出一种新型的位置灵敏探测器——微条气体室(Micro-strip Gas Chamber, MSGC)探测器,由于电极微条性引起的高粒子性和微条间距小,使得离子收集时间很短,可以满足在高记数率( $\sim 10^6\text{Hz}/\text{mm}^2$ )下工作,显示出很多优点<sup>[3]</sup>.但在研究中也发现了一些问题,主要是在雪崩过程中产生的电荷积累效应和高场下衬底不稳定性,严重影响了探测器正常工作和性能提高.

选择合适的衬底材料可以有效的防止电荷积累效应和衬底不稳定性,一般要求室温下衬底电阻率 $\leq 10^{15}\Omega\cdot\text{cm}$ <sup>[4]</sup>.根据经验<sup>[5]</sup>:20℃下电阻率在 $10^9$ — $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ 间最佳,对于室温下体电阻率在 $10^9$ — $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ 范围内的衬底,衬底表面抵消的正离子可达 $10^6\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但增加了漏电流,导致信噪比降低;同时,衬底应尽量薄而面积大,厚度越薄能量

损耗越少,散射和光损耗越少.虽然很多玻璃满足这一要求,但载流子主要是碱金属离子,在高场下会电解分解,离子如金属般沉积在阴极条上,间距中载流子抽空,导致表面电阻率的不稳定性和探测器微条附近电场强度的变化,Siegen实验组通过理论计算已经证实了这种解释<sup>[6]</sup>.郁忠强等<sup>[7]</sup>在 $\text{SiO}_2$ 上制作的MSGC只能在低记数率( $\sim 10\text{Hz}/\text{mm}^2$ )下工作,且很容易发生电荷积累和放电现象,及 $\text{SiO}_2$ 的龟裂.实验和理论证明:电子导电型材料作为MSGC衬底也有助于克服电荷积累效应和衬底在高场下的不稳定性<sup>[8]</sup>.

研究者们利用离子注入或半导体材料镀层对绝缘衬底表面进行改性(如图1所示)来降低MSGC工作中的电荷积累效应,取得了很大的成功.众所周知,DLC膜具有非常优良的性能,特别是其电学性质和抗辐射性,如表1所示.因此,本文主要用DLC膜

表1 DLC膜的优良的性能

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 电阻率 $10^9$ — $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$ | 介电系数 4—9                      |
| 禁带宽度 2.0—3.0eV                             | 击穿电场 $10^7\text{V}/\text{cm}$ |
| 热导率 0.7—1W/cm·K                            | 抗辐射强度高                        |
| 物理化学稳定性好                                   | 大面积低温沉积                       |

2003-06-27 收稿,2003-08-11 收修改稿

\* 国家自然科学基金(60072033)资助

对 D263 玻璃进行表面改性,从而制备 DLC 膜/D263 玻璃双层结构作为 MSGC 衬底.

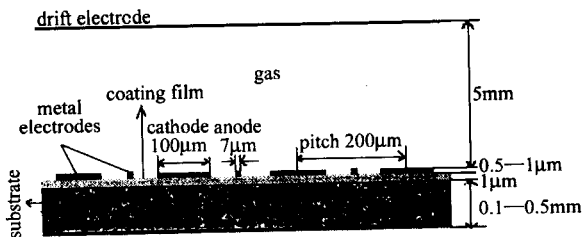


图 1 MSGC 的结构示意图

## 2 实验

DLC 膜是利用射频等离子体辅助化学气相沉积 (Radio Frequency Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition, RFPCVD) 法在 D263 玻璃 (2.4cm × 2.4cm × 0.017cm) 上制得的,碳源为高纯甲烷 (CH<sub>4</sub>), 甲烷和氩气体积比为 1:2, 反应压强 1—2Pa, 射频频率 13.56MHz, 负自偏压为 950V, 衬底负偏压 200V, 衬底温度由水冷控制在室温, 膜厚 ~ 1μm. 并制备了 4 种样品 (见图 2) 来进行 I-V, C-F 特性测试.

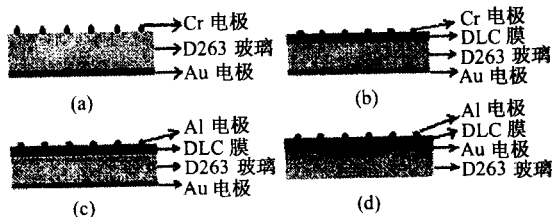


图 2 4 种样品结构

- (a) Au + glass + Cr; (b) Au + glass + DLC + Cr;
- (c) Au + glass + DLC + Al; (d) glass + Au + DLC + Al.

## 3 结果和讨论

碳材料中 sp<sup>2</sup> 和 sp<sup>3</sup> 杂化成分的比例是决定其多样性的主要因素, 含有高 sp<sup>3</sup> 杂化成分的非晶碳称为类金刚石 (DLC), 一般含氢非晶碳 (a-C:H) 中 sp<sup>3</sup> 含量较少<sup>[9]</sup>. DLC 膜的拉曼光谱如图 3 所示, 它有两个特征峰: D 峰和 G 峰, 分别对应 sp<sup>3</sup> 和 sp<sup>2</sup> 杂化. 其中位于 1589.61cm<sup>-1</sup> 的 G 峰认为是石墨相引起的, 具有 E<sub>2g</sub> 模式<sup>[10]</sup>, 而 1336.89cm<sup>-1</sup> 处的 D 峰认为是金刚石相引起的, 归应于无序晶格 k 矢量转换规则的破坏<sup>[11]</sup>. sp<sup>2</sup> 杂化决定薄膜的电学性质, 而 sp<sup>3</sup> 杂化成分决定了 DLC 膜的机械性能和其他性质. 从拉曼谱中峰的强度还可以看出, D 峰强度是 G

峰的一倍多, 而 sp<sup>2</sup> 杂化对拉曼响应是 sp<sup>3</sup> 杂化的 50 倍, 因此在 D263 玻璃上沉积出的 DLC 膜具有非常高的 sp<sup>3</sup> 杂化含量, 是一种高品质的 DLC 膜, I-V 曲线中 DLC 膜的高电阻率也肯定了这一结论.

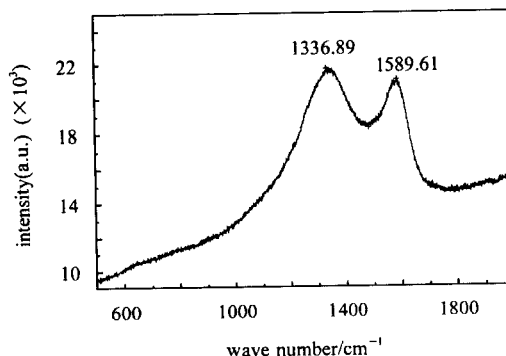


图 3 DLC 膜的拉曼光谱

其中 1336.89cm<sup>-1</sup> 为 D 峰, 1589.61cm<sup>-1</sup> 为 G 峰.

DLC 膜的基本电子结构主要由两部分组成: 一方面是 sp<sup>3</sup> 和 sp<sup>2</sup> 杂化的强 σ 键构成了价带中占有的成键态 (σ) 和导带中空的反键态 (σ\*), 带宽 ~ 5eV; 另一方面是 sp<sup>2</sup> 和 sp<sup>1</sup> 杂化的 π 键构成了占有的 π 态和未占有的 π\* 态, 它们位于 σ-σ\* 带隙内, 因此决定了材料的有效禁带宽度. 整个原子结构应该是 σ 键和 π 键的混合网络<sup>[12]</sup>, 其中 π 键上的价电子提供了导电载流子, 因此, DLC 膜是一种典型的电子导电型材料, 而电子导电型材料有助于提高 MSGC 的工作稳定性和降低电荷积累效应.

图 4 给出了 4 个样品的 I-V 曲线, I-V 关系可由公式  $\rho = \frac{RS}{L} = \frac{VS}{IL} = \frac{V}{I} \left( \frac{\pi \times 0.045^2}{L} \right)$  表示, 其中 S 代表点电极面积, L 样品厚度. 样品 (a) 与 (b) 或 (c) 比较, 很明显, D263 玻璃在低场下就表现出非常不稳定的电阻率. 首先, 电阻率随电压急剧增加, 然后在  $2.4 \times 10^9 - 1.7 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  范围呈波浪形周期变化. 在电场作用下, 碱金属离子快速向玻璃表面迁移, 从而导致表面电阻率的下降, 内部由于载流子的减少而使电阻率增加. DLC 膜/D263 玻璃复合材料 ((b) 和 (c)) 表现了非常好的 I-V 特性, 电阻率分别稳定在  $7.2 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  和  $3.3 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ . 同时, (b) 和 (c) 曲线也揭示出样品 (b) 的电阻率只是 (c) 的 1/4, 并且具有更好的线性, 因此, 铬比铝更适合在 DLC 膜上制作电极. 主要原因可能是铬与 DLC 膜在界面处形成了铬的碳化物中间过渡层, 有利于欧姆接触, 这种化学键的形成也提高了电极与薄膜间的结合力, 有利于 MSGC 的电极制作和光刻. 图 4(d) 是 DLC 膜的

I-V 曲线, 电流随电压线性变化, 其电阻率在  $10^4 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$  高场 (MSGC 工作电场强度) 下稳定在  $5.2 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ . 在 MSGC 探测器中衬底的性能是决定探测器性能最关键的指标, 而其中主要取决于衬底表面性能, DLC 膜/D263 玻璃用作 MSGC 复合衬底

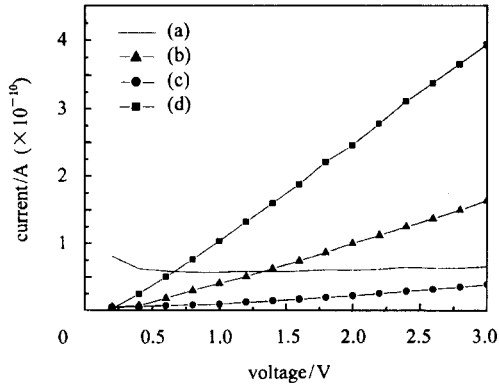


图 4 样品 I-V 曲线图

(a) Au + glass + Cr; (b) Au + glass + DLC + Cr;  
(c) Au + glass + DLC + Al; (d) glass + Au + DLC + Al.

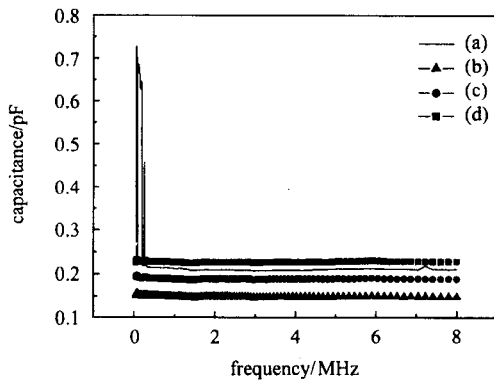


图 5 样品 C-F 曲线图

(a) Au + glass + Cr; (b) Au + glass + DLC + Cr;  
(c) Au + glass + DLC + Al; (d) glass + Au + DLC + Al.

时, 即取决于 DLC 膜的性能, 因此 DLC 膜/D263 玻璃是完全满足 MSGC 衬底的最佳要求.

对于 MSGC 探测器来说, 衬底电容及稳定性对于器件的时间响应和工作稳定性有很大影响, 因此我们对样品进行了 C-F 曲线分析 (如图 5 所示). 比较 (a), (b), (c) 曲线可知: 经过 DLC 膜改性后, 电容值有了很大的减小, 而且更加稳定, 同时 (b) 的电容值远低于 (c), 这也说明铬作为电极材料比铝更有优势.

## 4 结论

对于 MSGC 探测器来说, 衬底表面电阻率是最重要的参数, 对衬底表面改性来降低其电阻率已经取得了很好的结果, 尤其是在高辐射高计数率条件下可以有效避免电荷积累和提高衬底稳定性<sup>[13]</sup>. 针对 MSGC 在衬底电学性质方面的特殊要求和 DLC 膜的优良性能, 通过沉积 DLC 膜来改善 D263 玻璃表面电学性能, 从而制备 DLC 膜/D263 玻璃双层结构作为 MSGC 衬底材料. 拉曼光谱说明沉积出的是一种高品质的 DLC 膜, 并且是电子导电型薄膜材料; I-V 曲线显示了在 MSGC 工作电场 ( $\sim 10^4 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) 下, DLC 膜/D263 玻璃具有非常稳定的电阻率, 且其值在  $10^9 - 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  范围; C-F 曲线证明这种新材料具有非常小而稳定的电容; I-V 和 C-F 特性也揭示出铬比铝更适合作为 MSGC 电极材料, 这对于探测器防止放电现象具有重要意义. DLC 膜/D263 玻璃在几乎所有方面都满足 MSGC 探测器对衬底材料的最佳要求, 另外, DLC 膜的高击穿电场、抗辐射性、物理化学稳定性等优良性能, 使其成为 MSGC 探测器衬底材料的理想候选者.

## 参考文献 (References)

- 1 Charpak G et al. Nucl. Instrum. Methods, 1968, **A62**:235
- 2 Oed A. Nucl. Instrum. Methods, 1988, **A263**:351
- 3 Bouhali O et al. Nucl. Instrum. Methods, 1996, **A378**:423
- 4 Bishai M R et al. Nucl. Instrum. Methods, 1997, **A400**:233
- 5 Cicoqmani G et al. Nucl. Instrum. Methods, 1998, **A416**:263
- 6 Schmidt S et al. Nucl. Instrum. Methods, 1994, **A344**:558
- 7 YU Zhong-Qiang et al. HEP&NP., 1996, **20**(8):678 (in Chinese)  
(郁忠强等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(8):678)
- 8 ZHANG Ming-Long, XIA Yi-Ben, WANG Lin-Jun. Nucl. Electr. & Detec. Tech., 2003, **23**(2):113 (in Chinese)  
(张明龙, 夏义本, 王林军. 核电子学与探测技术, 2003, **23**(2):113)
- 9 Teo K B K et al. Diam. Relat. Mater., 2002, **11**:1086
- 10 Nemanich R J, Lucovsky G, Solin S A. Sol. Stat. Com., 1977, **23**:117
- 11 Meenakshi V, Sayeed A, Subramanyam S V. Mater. Sci. For., 1996, 223—224:307
- 12 Shimakawa K, Miyake K. Phys. Rev., 1989, **B39**:7578
- 13 Mack V et al. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A367**:173

## A Suitable Material for the Substrate of Micro-Strip Gas Chamber\*

ZHANG Ming-Long XIA Yi-Ben WANG Lin-Jun ZHANG Wei-Li

(School of Materials Science & Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Micro-strip Gas Chamber (MSGC) used as a position sensitive detector has perfect performances in the detection of nuclear irradiations. However, it encounters a severe problem, that is, positive charge accumulation which can be avoided by reducing the surface resistivity of insulating substrate. So, diamond-like carbon (DLC) film is coated on D263 glass to modify its electrical properties as substrate for MSGC. Raman spectroscopy demonstrates that DLC film is of  $sp^3$  ( $\sigma$  bonding) and  $sp^2$  bonding ( $\pi$  bonding), and therefore it is a type of electronically conducting material. It also reveals that the film deposited on D263 glass possesses very large of  $sp^3$  content and consequently is a high quality DLC film. I-V plots indicate that samples with DLC film enjoy very steady and suitable resistivities in the range of  $10^9$ — $10^{12}$   $\Omega \cdot \text{cm}$ . C-F characteristics also show that samples coated by DLC film have low and stable capacitance with frequency. These excellent performances of the new material, DLC film/D263 glass, meet the optimum requirements of MSGC. DLC film/D263 glass used as the substrate of MSGC should effectively avoid the charge pile-up effect and substrate instability and then improve its performances.

**Key words** MSGC detector, DLC film, electronically conducting material, charge pile-up effect