科 学 通 报
第 39 卷 第 22 期 CHINESE SCIENCE BULLETIN 1994 年 11 月

金刚石膜压阻效应的研究

王万录 X. Jiang C. P. Klages
(兰州大学物理系，兰州730001) (德国汉堡费郎和夫表面和薄膜工程研究所)

关键词 金刚石膜、压阻效应、应变

用化学气相方法合成的金刚石薄膜也具有天然金刚石的各种优异特性．它作为一种宽带隙半导体材料可制备出高温、高速、大功率和抗辐射的电子器件[1—4]．最近研究还发现，P 型金刚石膜有十分显著的压阻效应．特别是随着温度的升高这种效应会增强．Aslam 等人首次研究了 P 型多晶和同质外延金刚石膜的压阻效应[5]．他们的研究结果表明，P 型同质外延金刚石膜室温下 500×10^{-6} 应变时压阻因子(应变计灵敏度)至少是 500，超过了单晶硅(120)和多晶硅(30)，而多晶金刚石膜只有 6. Dorsch 等人的研究工作指出[6]，P 型多晶金刚石膜压阻因子在室温下只有 5.4，当温度从 27 ℃ 增加到 60 ℃ 时，压阻因子从 5.4 增加到 13.7．他们的实验研究得出如此低的压阻因子主要原因是用带有硅衬底的金刚石膜做实验，加在衬底上的力大部分没有传输到金刚石膜．据 Aslam 估计，应力引起金刚石膜的应变只是衬底的 30% 左右，这就大大降低了测量灵敏度．

在这个工作中，我们利用四点弯曲法研究了 P 型金刚石膜的压阻效应．直接将金刚石膜片(无硅衬底)粘附在不锈钢片上，测量应变引起的电阻变化，从而大大提高了测量灵敏度．室温下 300×10^{-6} 应变时，P 型多晶金刚石膜最大压阻因子为 250，大大超过了单晶硅和 Aslam 结果．

实验中所用的金刚石膜是利用微波等离子体 CVD 法制备的 (ASTeX 1.5kW)．具体沉积条件如表 1 所示．硼掺杂是由氢气通过 $B(OCH_3)_3$ 源进入反应室形成的．通过控制氢携带 B 源流量、源温度等来调节 B 掺杂浓度．金刚石膜厚度为 4μm 左右．

表 1 微波等离子体 CVD 法生长金刚石膜条件

衬底材料	Si(100)
气体源	99.5%H_2+0.5%CH_4
衬底温度	750—900 ℃
总气压	16—19 mbar
微波功率	750—850 W

表 2 P 型金刚石膜中 B/C 比率

样品号	B/C (ppm)
129	44
133	32
137	2

金刚石膜的质量由 Raman 谱，扫描电镜和电学测量等表征．膜中 B 含量通过 2 次离子质谱分析获得．表 2 给出了样品中 B/C 比率．

四点弯曲法测量薄膜应变装置如图 1 所示．用 HF 和 HNO_3 混合溶液腐蚀掉硅衬底只留金刚石膜，并用环氧树脂将其粘附在不锈钢片上．为了提高测量灵敏度，不锈钢片及环氧树脂层厚度分别为 50 μm 和 30μm 左右．当微米标尺向不锈钢片施加力时，金刚石膜受到伸张应力而发生形变．由已知的金刚石膜及不锈钢片力学性质和微米标尺所示的位置，可得出

1994-02-25 收稿，1994-07-16 收修改稿．

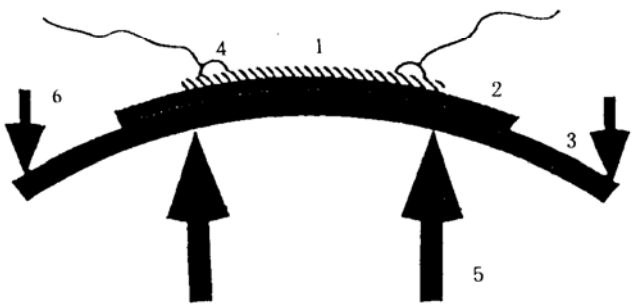

图 1 四点弯曲法测量金刚石膜应变示意图
1 为金刚石膜，2 为环氧树脂层，3 为不锈钢片，4 为电极，5 为微米标尺，6 为框架

金刚石膜的应变量.并用标准应变计和计算机模拟计算进行校准.同时用四点法确定金刚石膜电阻相对变化量.应变方向和电流方向相同.

图 2 表示 P 型多晶金刚石膜在室温时电阻相对变化与应变量之间关系.金刚石膜电阻相对变化 dR/R_0 与应变 ε 之间呈线性关系.电阻变化 $dR=R(T)-R_0(T)$, 其中 $R(T)$ 和 $R_0(T)$ 表示在温度 T 时，应变为 ε 和 0 时的电阻值.一般重掺杂时压阻效应比轻杂时小.但在我们的实验中，更低的硼掺杂样品有更小的效应，应变增加

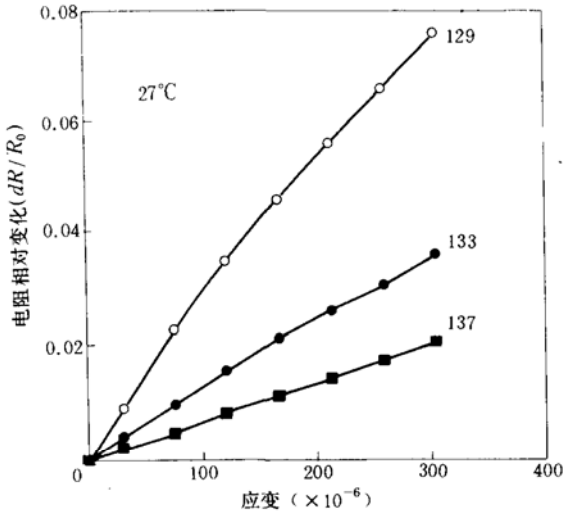

图 2 金刚石膜电阻相对变化与应变之间关系

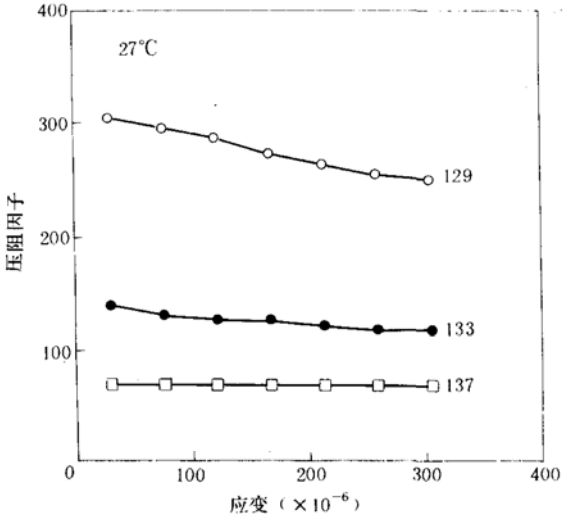

图 3 P 型多晶金刚石膜在不同硼浓度下压阻因子与应变关系

和减小时，电阻相对变化可重复．在计算中薄膜本征应变忽略不计.

图 3 表示室温下不同硼掺杂浓度金刚石膜压阻因子同应变的关系．压阻因子 K 定义为

$$K=\left(\frac{dR}{R_0}\right)\Big/d\varepsilon=1+2\nu_f+\left(\frac{1}{\rho_0}\right)\frac{d\rho}{d\varepsilon},$$

式中 ρ 和 ρ_0 表示应变分别为 ε 和 0 时金刚石膜的电阻率；ν_f 是金刚石膜的泊松比，并近似为 0.1. 如果电阻率变化 $d\rho=0$ 时，$K\simeq1.2$. 这时的压阻效应主要是膜几何尺寸变化所致，因此只是几何尺寸变化不可能引起更大的压阻效应. 从图 3 可知，当金刚石膜中 B/C 比率达到 44 ppm 时，在室温下 300×10^{-6} 应变时的压阻因子约为 249. 这个值大大超过了单晶硅、多晶硅及 Aslam 等人的研究结果.

一般认为 P 型半导体压阻效应是由于应变诱导轻重空穴带分裂，从而改变了平均空穴质

量和迁移率．P 型多晶金刚石膜也有类似应变引起受主能级相对价带分裂的可能性．室温下约有 1% 硼受主原子上的空穴被激发到价带顶．因为 P 型多晶金刚石膜受主原子的激活能约为 0.2—0.3eV．因而电导率对受主原子激活能的改变是十分敏感的．我们实验结果表明，在 300K 时，当 ε 从 30×10^{-6} 增加 1000×10^{-6} 应变时，硼受主原子激活能增加 1% 左右．在多晶金刚石膜中晶粒间界的存在是引起较大压阻效应的另一个原因．在多晶薄膜中电阻率取决于电子的 3 种散射机构，即：体散射(声子、杂质及点缺陷散射)、膜表面散射及晶粒间界散射．当膜很薄而晶粒又小时，这时主要是晶粒间界散射起作用．晶粒间界散射因子与间界类型、间界上杂质积累、晶粒几何尺寸及曲率等有关．应变会引起晶粒间界形状等改变，从而改变电子散射强度．我们实验已证明，在相同掺杂浓度下，小晶粒组成的金刚石膜比大晶粒膜有更大的压阻效应．因为小晶粒膜有更大的晶粒间界．

致谢　R.Taube 博士进行了薄膜应变计算机模拟计算，R.Six 工程师帮助建立了压阻效应测试装置，在电学测量中 E.Boettger 给予了许多帮助，特此表示感谢．

参　考　文　献

[1] Augus, J. C., Hayman, C. C., *Science*, 1988, **241**: 913—921.
[2] Spear, K. E., *J. Amer. Cerm. Soc.*, 1987, **79**: 171—191.
[3] Wei Zhu *et al.*, *Proceedings of the IEEE*, 1991, **79**: 621—646.
[4] Geis, M. W., *Proceedings of the IEEE*, 1991, **79**: 669—675.
[5] Aslam, M. *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 2923—2925.
[6] Dorsch, O. *et al.*, *Diamond and Related Materials*, 1993, **2**: 1096—1099.