

传输线模型测量 Au/Ti/p 型金刚石薄膜的 欧姆接触电阻率*

王印月 甄聪棉 龚恒翔 阎志军 王亚凡 刘雪芹 杨映虎 何山虎

(兰州大学物理系, 兰州 730000)

(1999 年 11 月 1 日收到 2000 年 1 月 8 日收到修改稿)

采用传输线模型测量了重 B 掺杂 p 型金刚石薄膜(约 10^{20} cm^{-3})上 Ti/Au 欧姆接触电阻率 ρ_c , 测试了 500°C 退火前后及大电流情况下的 $I-V$ 特性, 研究了退火对 ρ_c 的影响. 结果表明, 重掺杂和退火工艺是改善欧姆接触的有效手段. ρ_c 随测试温度的变化表明金属/半导体接触界面载流子输运机制为隧道穿透. 而光照对 ρ_c 影响的分析表明金刚石可作为理想窗口材料. 测试得到的最低 ρ_c 值约为 $10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$.

关键词: 金刚石薄膜, 欧姆接触, 接触电阻率

PACC: 7340, 8140

1 引 言

半导体金刚石以其优越的综合性质, 成为高频和高功率器件的首选材料. 例如, 金刚石具有固体材料在常温时最高的热导率, 它是 Si 热导率的 10 倍之多, 它的击穿电场是 Si 或 GaAs 的 20 倍, 它的大功率晶体管的截止频率是 Si 或 GaAs 的 40 倍, 在功耗方面, 要比 Si 好 8200 倍. 它具有惊人的硬度和很宽频带的通透性、宽带隙(约 5.5 eV)优良的抗腐蚀、抗辐射破坏性等优点. 所有这些特性, 使得它在大规模集成电路芯片、大型场效应管和发光管等方面具有广泛的应用前景^[1]. 近年来, 人们对金刚石进行了大规模的研究. 然而, 目前将金刚石薄膜制成电子学器件, 还只取得的初步成果, 限制它发展的原因除了必须获得高质量的金金刚石薄膜外, 还必须解决金刚石薄膜上的电接触问题. 因而, 制备低接触电阻率的欧姆接触, 已成为普遍感兴趣的热点课题之一.

接触电阻率 ρ_c 是反映金属/半导体欧姆接触性能好坏的重要参数. 测量 ρ_c 的方法很多, 主要有传输线模型(TLM)和圆形传输线模型(CTLM)^[2,3]等测试方法. 其中 TLM 以其理论成熟、制作工艺简单、测试方便等成为目前普遍采用的测试方法.

本文采用 TLM 测量了 Au/Ti/p 型金刚石薄膜

欧姆接触电阻率. 测试了退火前后 Au/Ti/p 型金刚石薄膜接触的 $I-V$ 特性, 同时, 对大电流的情况也作了研究. 讨论了退火对接触电阻和接触电阻率的影响. 分析了接触电阻和接触电阻率随测试温度的变化, 进而提出了在金属/半导体接触界面载流子的输运机制. 研究了光照对 Au/Ti/p 型金刚石薄膜接触电阻和接触电阻率的影响. 实验所得最低 ρ_c 值约为 $10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$.

2 实 验

2.1 样品制备

实验采用 Si 衬底上表面光滑的掺 B p 型金刚石单晶膜. 掺 B 浓度为 10^{16} cm^{-3} . 对于制备欧姆接触, 此浓度还远远不够, 因此, 对单晶膜进行了高浓度 B 离子注入(约 10^{20} cm^{-3} , 60 keV, 200°C). 图 1 示出离子注入前后 p 型金刚石薄层电阻率 ρ_s 与测试温度 T 的函数关系. 得到的 ρ_s 对 T 的依赖性与文献[2]一致, 体现了离子注入的效果. 将离子注入后的样品放在 1:1 的 H_2O_2 和 H_2SO_4 混合液中进行清洗, 目的在于消除非晶碳层和表面导电层. 表面导电层是由 H 驻留在表面形成的. 将烘干后的样品, 在真空(约 10^{-5} Pa)1100°C 退火 30 min, 自然冷却到

* 国家自然科学基金(批准号 69676005)资助的课题.

接近室温. 再将样品放入 200℃ 的 CrO_3 和 H_2SO_4 混合液中处理 30 min, 以除去由于退火在表面形成的石墨层. 然后, 用射频溅射法在上述处理过的金刚石薄膜上依次溅射金属电极 Ti(约 20 nm) 和 Au(约 100 nm), 再利用半导体集成电路中的光刻技术, 刻蚀出了适用于 TLM 的测试结构. 为了比较, 对样品进行了退火前后欧姆接触电阻率的测试. 退火是在真空中(约 10^{-5} Pa)进行的, 条件为 500℃, 15 min. 在以前的研究中发现, 这个退火条件能提供低的 ρ_c 值^[2,4].

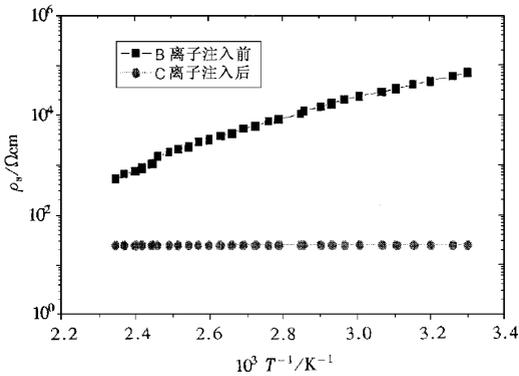


图1 离子注入前后金刚石薄层电阻率 ρ_s 与温度倒数的函数关系

2.2 测试方法

TLM 是测试欧姆接触电阻率传统且成熟的测试方法, 其测试结果较为精确. 图 2 为这种方法的测试结构图. 概括而言就是在半导体薄膜上做成线型排列的一系列长为 w 、宽为 d 的金属电极, 在其中任选三个相邻的金属电极(为方便起见, 标称 1, 2,

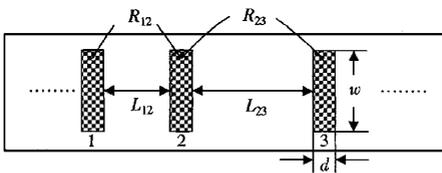


图2 测量欧姆接触电阻率的台面结构图

3) 如图 2 所示, 于是有

$$R_{12} = R_s \frac{L_{12}}{w} + 2R_c, \quad R_{23} = R_s \frac{L_{23}}{w} + 2R_c,$$

因而, 接触电阻为

$$R_c = \frac{R_{12}L_{23} - R_{23}L_{12}}{2(L_{23} - L_{12})}, \quad R_s = \frac{w(R_{23} - R_{12})}{L_{23} - L_{12}}, \quad (1)$$

式中 R_s 为扩散层的薄层电阻. 一般情况下, 认为接触下的薄层电阻与接触间的薄层电阻相同. 通过有关 TLM 理论计算^[5], 最后得

$$R_c = \frac{R_{12}L_{23} - R_{23}L_{12}}{2(L_{23} - L_{12})} = Z \coth(\alpha d), \quad (2)$$

式中 $Z = \frac{1}{w} \sqrt{R_s \rho_c}$, 称为传输线的特征电阻. $\alpha = \sqrt{R_s / \rho_c}$ 称为传输线的衰减常数. 测得 R_{12} 和 R_{23} 之后, 由(1)式算得 R_s 值, 再将有关的已知量和 R_s 值代入(2)式, 通过计算机编程运算, 可得 ρ_c 值. 本文所用样品光刻尺寸为金属电极边长为 200 μm 的正方形, 电极间距分别为 10, 20, 30, 40, 50 和 100 μm .

3 结果与讨论

3.1 接触的 I-V 特性

图 3 示出电极间距为 10 μm 的 Au/Ti/p 型金刚石薄膜退火前后的 I-V 特性. 值得指出的是在退火前, 曲线就已表现出很好的线性, 说明退火前这种接触已表现为很好的欧姆接触. 退火后, 曲线明显靠近电流轴, 且线性更好, 说明退火使测量电阻大大降低. 图 4 示出大电流情况下的 I-V 曲线, 仍呈现出非常好的线性, 体现了这种接触从小电流到大电流均呈现很好的欧姆接触特性.

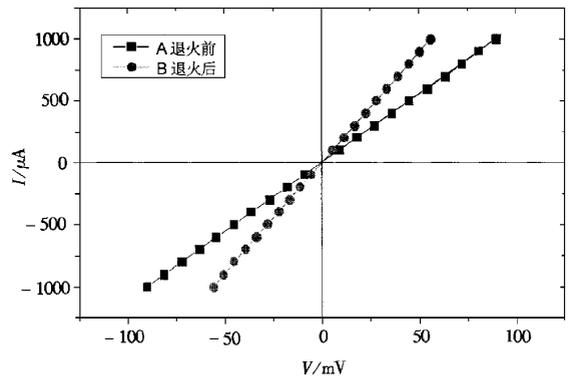
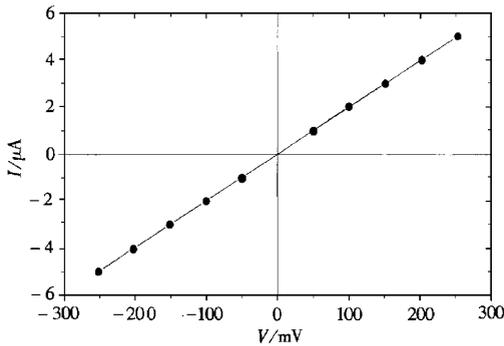


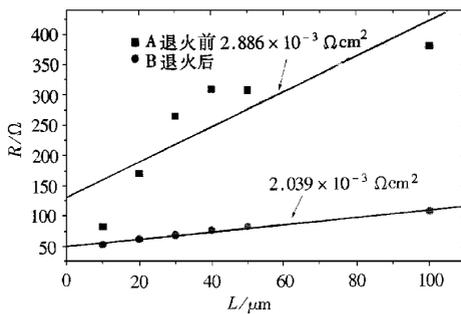
图3 电极间距为 10 μm 退火前后的 I-V 曲线

3.2 退火对接触电阻率的影响

图 5 为 Au/Ti/p 型金刚石系列接触退火前后的 R-L 图. R 为相邻接触之间的电阻, L 为对应的电极间距. 图 5 中两条直线分别对应退火前后计算

图 4 大电流情况下, 电极间距为 $10 \mu\text{m}$ 的 $I-V$ 曲线

机模拟直线. 由图 5 可看出, 两种情况下, 随 L 的增大, R 均增大, 这是由于 L 增大引起相邻接触之间

图 5 系列接触退火前后相邻接触之间的电阻 R 与对应的电极间距 L 的函数关系

串联半导体的体电阻增大所致. 退火前线性较差, 线性相关系数为 0.86395, 退火后, 各点几乎均在直线上, 线性相关系数变为 0.99255, 说明退火使接触达到均一. 由图 5 还可看出, 退火后电阻轴上的截距 ($2R_c$) 明显减小, 接触电阻率从 $2.886 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$ 降到 $2.040 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$. 可见, 退火工艺的确是改善金刚石样品欧姆接触的有效手段. 在本文整个测试中得到的最低 ρ_c 值约为 $10^{-4} \Omega\text{cm}^2$.

3.3 温度对接触电阻率的影响

图 6 示出接触电阻和接触电阻率随测试温度的变化. 由图 6 可看出, 随温度的升高, 它们均明显减小, 这一结果与文献[6]一致. Chang 等人定义接触电阻率的热系数^[6] $\gamma = -\frac{1}{\rho_c} \frac{\partial \rho_c}{\partial T}$. 对于本文的样品, 计算得热系数 γ 为 $1.0199 \times 10^{-3} \ll 1$. 这表明在接触金属 Ti 和金刚石界面载流子的运输机制主要是隧道穿透.

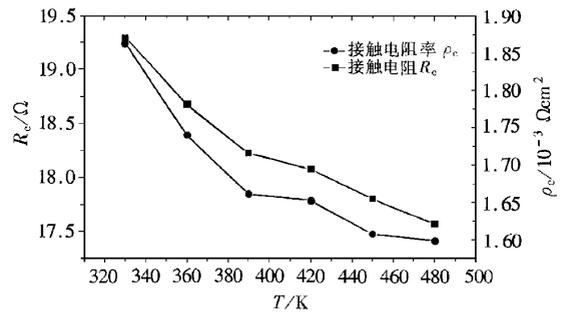


图 6 接触电阻和接触电阻率随测试温度的变化

3.4 光照对接触电阻率的影响

测量和计算了接触电阻随光强的变化, 其结果示于图 7 (右纵轴为相应的接触电阻率). 随照射到样品上光强的变化, 接触电阻和接触电阻率几乎呈一条水平直线, 只是在 $120 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 处, 数值有所降低. 这充分体现了金刚石样品的较低的光吸收系数和很高的光学穿透率. 在 $120 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 处, R_c 和 ρ_c 值略微降低, 这可能是由于强光照射引起样品略微升温所致.

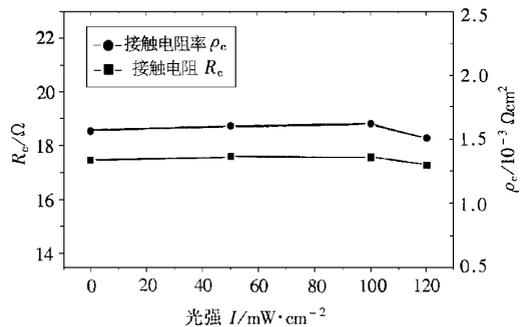


图 7 接触电阻和接触电阻率随光强的变化

4 结 论

本文系统地对比 Au/Ti/p 型金刚石接触使用 TLM 进行了详细研究. 通过对该接触进行退火和随温度、光照强度等的测试与分析, 得出下列结论:

1. 对金刚石薄膜表面的重掺杂是形成欧姆接触的重要手段. 样品在退火前已形成很好的欧姆接触, 退火工艺改善了欧姆接触性能.
2. 测试温度对接触电阻率有明显影响. 随温度的升高, 接触电阻率明显降低, 表明高掺杂水平下, 隧道穿透是载流子通过界面的主要运输机制.

3. 由于金刚石较低的光吸收系数和很高的光学穿透率,对光照并不敏感,说明金刚石的确可作为理想的窗口材料.

4. 实验中得到的最低 ρ_c 值约为 $10^{-4}\Omega\text{cm}^2$.

感谢张文军博士提供金刚石单晶样品.

[1] W. Zhu, B. R. Stoner, B. E. Williams *et al.*, *Proc. IEEE*, **79** (1991), 621.

[2] M. Yokoba, Y. Koide, A. Otsuki *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **81** (1997), 6815.

[3] C. A. Hewett, M. J. Taylor, J. R. Zeidler *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **77** (1995), 755.

[4] J. Nakanishi, A. Otsuki, T. Oku *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **76** (1994), 2293.

[5] H. H. Berger, *Solid-State Electronics*, **15** (1972), 145.

[6] C. Y. Chang, Y. K. Fang, S. M. Sze, *Solid-State Electronics*, **14** (1971), 541.

MEASUREMENT OF THE SPECIFIC CONTACT RESISTANCE OF Au/Ti/p-DIAMOND USING TRANSMISSION LINE MODEL*

WANG YIN-YUE ZHEN CONG-MIAN GONG HENG-XIANG YAN ZHI-JUN WANG YA-FAN
LIU XUE-QIN YANG YING-HU HE SHAN-HU

(Department of Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

(Received 1 November 1999; revised manuscript received 8 January 2000)

ABSTRACT

The measurements of the specific contact resistance (ρ_c) were carried out for Ti/Au ohmic contact to heavily boron-doped p-diamond ($\sim 10^{20}\text{cm}^{-3}$) by the transmission line model (TLM). *I-V* measurements were performed before and after annealing at 500°C , as well as in big current cases. The annealing effects on the ρ_c value were investigated. It is shown that heavy doping of the semiconductor and annealing are effective means to improve ohmic contacts. The changes of ρ_c value with the operating temperature are discussed. We suggest that the dominant transport mechanism at the metal/semiconductor interface is tunneling. No light effects on the ρ_c value have been observed, the results show that diamond can be an ideal window material. In our experiments, the smallest ρ_c value of the Au/Ti/p-diamond reaches $\sim 10^{-4}\Omega\text{cm}^2$.

Keywords: diamond film, ohmic contact, specific contact resistance

PACC: 7340, 8140