

MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结的制备与直流特性

周章渝 肖寒 王松 傅兴华 闫江

Preparation and DC characteristics of MgB₂/B/MgB₂ Josephson junctions

Zhou Zhang-Yu Xiao Han Wang Song Fu Xing-Hua Yan Jiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 180301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.180301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.180301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

共心双环外势中两分量偶极玻色-爱因斯坦凝聚体的基态结构研究

Ground state of a two-component dipolar Bose-Einstein condensate confined in a coupled annular potential

物理学报.2015, 64(6): 060302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060302>

简谐+四次势中自旋轨道耦合旋转玻色-爱因斯坦凝聚体的基态结构

Ground state of a rotating spin-orbit-coupled Bose-Einstein condensate in a harmonic plus quartic potential

物理学报.2015, 64(3): 030302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.030302>

空间调制作用下 Bessel 型光晶格中物质波孤立子的稳定性

Stabilization of matter-wave solitons in Bessel optical lattice by spatial modulation of the nonlinearity

物理学报.2014, 63(22): 220303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.220303>

线性与非线性光晶格中偶极孤立子的稳定性

Stability of dipolar soliton in crossed linear and nonlinear optical lattices

物理学报.2014, 63(15): 150302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.150302>

自旋轨道耦合玻色-爱因斯坦凝聚体在尖端势垒散射中 Klein 隧穿

Klein tunneling in spin-orbit coupled Bose-Einstein condensate scattered by cusp barrier

物理学报.2014, 63(11): 110306 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110306>

MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结的制备与直流特性*周章渝^{1)3)†} 肖寒²⁾ 王松¹⁾ 傅兴华¹⁾ 闫江³⁾

1) (贵州大学大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

2) (贵州民族大学化学与环境科学学院, 贵阳 550025)

3) (中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

(2016年4月20日收到; 2016年6月16日收到修改稿)

本文采用 MgB₂ 薄膜的混合物理化学气相沉积制备技术和金属掩膜版工艺, 以 B 膜为势垒层在单晶 Al₂O₃(0001) 基底上制作了纵向三明治结构的 MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结. 应用标准四引线法对该超导结的 R - T 曲线和不同温度下的直流 I - V 曲线进行了测量研究. 实验结果表明, 制作的 MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结超导开启温度为 31.3 K, 4.2 K 时临界电流密度为 0.52 A/cm², 通过对直流特性 I - V 曲线的微分拟合, 清晰地观测到 MgB₂ 的 3D 带的能隙 Δ_{π} 为 2.13 meV.

关键词: MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结, 金属掩膜版工艺, 混合物理化学气相沉积

PACS: 03.75.Lm, 74.78.Fk, 74.81.Fa, 85.25.Hv

DOI: 10.7498/aps.65.180301

1 引言

基于约瑟夫森结的超导电子技术 (superconducting integrated circuit, SIC) 以磁通量子为信息的基本载体^[1], 可以构成超快速度和超低功耗的数字复杂系统^[2-4], 成为了延展集成电路摩尔定律的重要研究方向. MgB₂ 材料的超导转变温度 T_c 达到 39 K, 且具有典型的金属特性, 简单的化学结构, 较长的相干长度和较高的临界电流密度. 为保证超导参数临界电流密度 J_c , 临界磁场 H_c 和超导能隙值 Δ 基本不变, 通常将超导电子器件或 SIC 的工作温度限制在 $2T_c/3$, 预示 MgB₂ 为基础的 SIC 可工作在 20 K 以上, 其制冷系统的效率至少是液氮温区制冷系统效率的 5 倍以上, 其低温工作环境的获得可以在比铌 (Nb) 基超导集成电路低得多的成本下实现, 而且现有低温技术可提供多种具有较高制冷效率的制冷设备 (包括便携式设备)^[5], 可以大为扩展 MgB₂ 超导电子的应用范围. Nb 的超导带隙为 1.5 meV, Nb 基 T 型触发器的最高工作频率

达 770 GHz^[6]. 较高质量的 MgB₂ 的超导能隙 Δ_s 都在 2 meV 以上^[7], 由于超导能隙与工作频率的关系, MgB₂ 超导集成电路可工作在太赫兹频率, 这样可以进一步提高约瑟夫森结器件电路的性能.

根据铌基 SIC 的工艺经验, 纵向超导薄膜/绝缘介质层/超导薄膜 (superconducting thin films/insulation/superconducting thin films, SIS) 的约瑟夫森结结构更有利于提高集成度和电路的整体性能. 从已有文献来看, MgB₂ 基 SIC 的研究还处于单个或几个约瑟夫森结的制备和特性研究阶段. 从 2001 年以来, 许多研究小组^[8-12] 制作出不同金属氧化物的 MgB₂/金属氧化物/MgB₂ 纵向约瑟夫森结, 值得关注的是 Chen 等^[8] 运用他们独特的混合物理化学气相沉积 (hybrid physical-chemical vapor deposition, HPCVD) 技术, 原位制作了 MgB₂/MgO/MgB₂ 结构, 还异位制备了 MgB₂/AlN/MgB₂ 结构 (脉冲激光沉积 AlN), 在 4.2 K 时, 其临界电流密度达到了 275 kA/cm², 接近铌基的超导约瑟夫森结, 其超导开启温度 (T_c 约

* 贵州大学博士科研启动基金 (批准号: (2013)18 号) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zzy9404@sina.com

40 K) 远远超过铌基约瑟夫森结 (T_c 约 9.2 K) 的水平. 然而, MgB_2 薄膜中 Mg 元素超强的夺氧能力使得在膜层间产生多硼相和其他氧化物杂质, 使得器件微观结构和超导电学特性受到影响, 同时金属氧化物的制作增加了金属膜设备成本和工艺环节. 单质无定形硼 (B) 熔点高达 2473 K、沸点为 3473 K, 并且具有 10^6 — 10^{13} Ω/cm 的电阻系数. 采用无定形 B 作为 MgB_2 基 SIC 的绝缘介质材料, 可以充分发挥工艺兼容和成本降低的优势. 本研究小组前期通过分析热力学计算发现 MgB_2 -B 体系可能存在化学反应的吉布斯自由能变化值与温度函数关系, 认为标准大气压下在 298—1000 K 温度范围内 B- MgB_2 体系具有良好的化学稳定性, 并通过 B/ MgB_2 异质结不同温度退火实验得到了验证. 柯一青等 [13] 和许壮 [14] 采用电子束蒸发工艺制备出纵向的 MgB_2 /B/ MgB_2 约瑟夫森结, 由于 MgB_2 薄膜过低的成相温度导致薄膜超导转变温度不高, 直接影响了器件的超导电学特性. 基于此, 本研究小组在国内外同行研究的基础上, 采用无定形 B 作为 MgB_2 超导薄膜 SIS 约瑟夫森结的势垒层材料, 充分发挥 HPCVD 技术制备的 MgB_2 薄膜具有约为 40 K 超导转变温度和 C 轴准单晶结构的优点, 制作出了 MgB_2 /B/ MgB_2 约瑟夫森结, 并对其直流电学特性进行了测量研究.

2 实验过程

本研究获得 MgB_2 /B/ MgB_2 约瑟夫森结是在北科仪公司生产的 DM-400 真空沉积系统中, 应用本小组前期所报道的制作 MgB_2 薄膜 HPCVD 和 B 膜的化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 技术工艺 [15,16] (工艺参数见表 1) 结合金属掩膜技术, 在单晶 $Al_2O_3(0001)$ ($5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$) 基底上制备 MgB_2 /B/ MgB_2 约瑟夫森结, 图 1 给出了具体制备工艺流程图. 实验中使用的是厚度为 0.5 mm 钼 (Mo) 金属掩膜版, 较厚的金属片保证了版膜间的压力强度, 使得结合更为紧密, 增加了图形的精度, 并且, Mo 金属优良的化学稳定性避免了在超导结 700—1000 K 的高温制作流程中金属掩膜版与薄膜层相互扩散反应.

图 1(a) 所示应用 HPCVD 工艺在单晶 $Al_2O_3(0001)$ 基底上生长 100 nm 厚的 MgB_2 薄膜,

见图 1(b). 为了获得 SIS 超导结底层电极, 同时为了防止侧壁上下两层超导薄膜粘连, 在随后 B 膜势垒层生长过程中, 使用 $3\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的 Mo 金属掩膜版距基底右侧约 0.1 mm 处正中放置, 见图 1(c). 以 B_2H_6 为气源, 利用 CVD 工艺制备出厚度约为 35 nm 的无定形 B 势垒层. 同时, 由于掩模版的遮挡自然获得底层 MgB_2 薄膜电极, 如图 1(d) 所示. 最后, 为了不让裸露的底层电极与顶层超导薄膜粘连, 在顶层 MgB_2 薄膜制备过程中, 采用面积较大的 $6\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的 Mo 金属掩膜版对齐底层电极左侧, 见图 1(e), 再次应用 HPCVD 工艺获得 100 nm 厚的顶层 MgB_2 薄膜层, 获得 MgB_2 /B/ MgB_2 约瑟夫森结, 侧面示意图如图 1(f) 所示. 介质层 B 膜厚的控制主要是通过沉积时间来决定, 然而我们发现在顶层超导薄膜生长过程中要消耗一定厚度的 B 膜, 多次实验结果表明在顶层 MgB_2 生长过程中介质层的厚度减薄了 25 nm 左右, 其误差约为 0.9—1.5 nm, 扣除实验中消耗的介质层, 推算出约瑟夫森结势垒层厚度为 10 nm, 结区面积约为 $4\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. 在 Quantum Design 公司生产的综合物性测量系统 (physical property measurement system, PPMS) 中采用标准四引线法对制作的 MgB_2 /B/ MgB_2 超导约瑟夫森结的 R - T 曲线和直流 I - V 特性进行了测量, 为了消除热电势的影响, 测试电流采用频率为 30 Hz 交流锯齿电流.

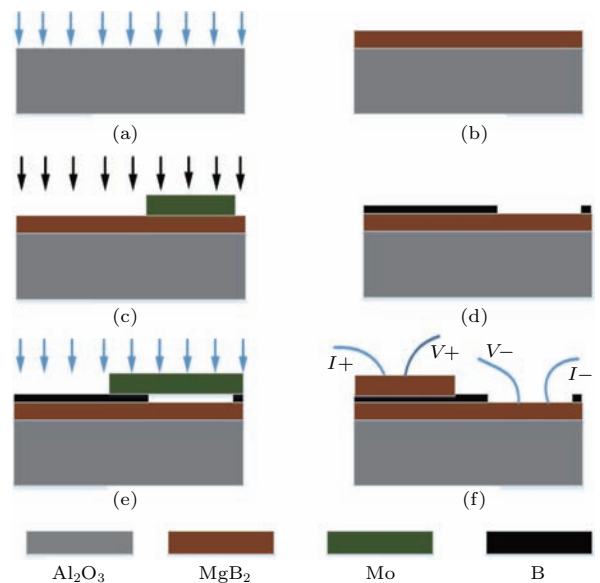


图 1 MgB_2 /B/ MgB_2 约瑟夫森结工艺流程
Fig. 1. Fabrication process of MgB_2 /B/ MgB_2 Josephson junction.

表1 制备 MgB₂ 和 B 薄膜的工艺参数
Table 1. Process parameters for the preparation of MgB₂ and B films.

薄膜名称	本底真空度/Pa	沉积真空度/Pa	基底温度/K	H ₆ B ₂ 流量/sccm	Ar, H ₂ 流量/sccm	沉积速率/Å·s ⁻¹
MgB ₂ 薄膜	10 ⁻⁴	10 ²	973	5	100	3
B 薄膜	10 ⁻⁴	10 ³	723	20	100	5

3 实验结果与讨论

为了探讨超导结上下两层超导薄膜的超导特性对于约瑟夫森结效应的影响, 本文特利用相同的工艺条件制作了 MgB₂/B/MgB₂ 多层膜, 测量了两层超导膜的 $R-T$ 曲线. 图 2(a) 和图 2(b) 分别给出了测试电流大小为 0.05 mA 样品约瑟夫森结和相同工艺条件下制作的 MgB₂/B/MgB₂ 多层膜的顶层和底层 MgB₂ 薄膜的 $R-T$ 测试曲线, 插图为超导转变温度附近区域的放大. 以剩余电阻的 90% 和 10% 定义为超导转变温度 T_{conset} 和零电阻温度 T_{c0} , 则 SIS 结及上下层 MgB₂ 薄膜分别为 33.3—31.4 K, 39.7—39.1 K 和 39.8—39.3 K. 室温下 ($T = 300$ K) 顶层和底层 MgB₂ 薄膜层电阻分别为 0.46, 0.38 Ω , 接近超导转变温度时 ($T = 39$ K)

薄膜电阻约为 0.13 和 0.06 Ω , 两层的剩余电阻比率 $RRR = R_{300\text{ K}}/R_{40\text{ K}}$ 分别为 $RRR_{\text{Top}} \approx 3.5$ 和 $RRR_{\text{Bottom}} \approx 6.3$. 由于底层 MgB₂ 薄膜经过两次高温热处理过程, 结晶程度进一步得到加强, 薄膜晶粒间的连通性大幅增强, 减弱了自由电子在晶界间的散射, 提高了迁移率, 降低了室温电阻率, 超导电学特性略强于顶层 MgB₂ 薄膜. 应用 Drude 公式, 电子平均自由程 $l = 3/[\rho N(0)v_F e^2]$, 其中载态密度 $N(0) = 0.7 \text{ eV}^{-1} \cdot \text{unit cell}^{-1}$ [17], 平面费米速度 $v_F = 4.8 \times 10^7 \text{ cm/s}$ [18], 薄膜电阻率采用公式 $\rho = 4.35d \times U/I$ (d 为超导薄膜样品的厚度), 分别得到顶层和底层电子平均自由程 l_{Top} 约为 33 nm, l_{Bottom} 约为 41 nm, 远大于 MgB₂ 块材样品中的相干长度 5—7 nm [19], 说明两层超导薄膜层的超导相非常纯净. 根据 Rowell 等 [20] 从实验规律总结推

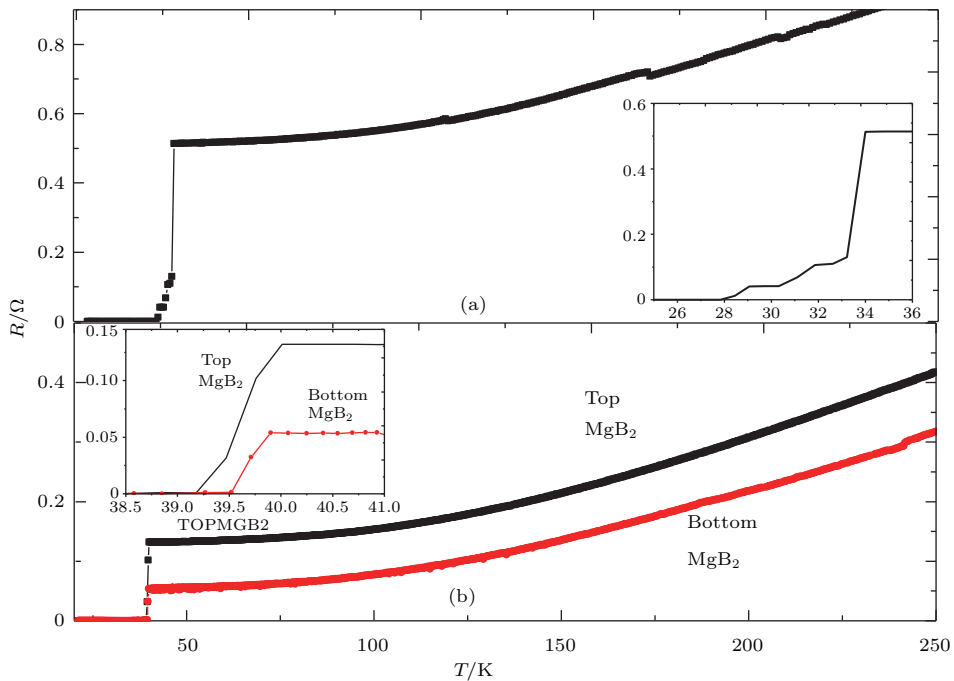


图2 (a) MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结的 $R-T$ 测试曲线; (b) 相同工艺条件下制作的 MgB₂/B/MgB₂ 多层膜的顶层和底层 MgB₂ 薄膜的 $R-T$ 测试曲线

Fig. 2. (a) Resistance versus temperature curves of a MgB₂/B/MgB₂ Josephson junction; (b) resistance versus temperature curves of the top MgB₂ layer and the bottom MgB₂ layer of the MgB₂/B/MgB₂ tilayers fabricated with the same process.

算临界电流密度值的经验公式 $J_c \propto 1/\rho_{50-300\text{ K}}$, 可以估算出上下两层超导薄膜临界电流密度约为 10^7-10^8 A/cm^2 , 这为制备优良的约瑟夫森结奠定了良好的基础. 由于B膜势垒层的介入, 使得所制备的约瑟夫森结样品的超导转变温度相比于单层超导薄膜降低了约 6 K, 转变宽度增加了约 1.4 K, 由于在超导结的热激发相滑移 (thermally activated phase slippage, TAPS) [21], 图 2 (a) 插图中的超导转变区域出现了一定程度的“拖尾”现象.

图 3 所示为不同测量温度下对约瑟夫森结样品进行直流 $I-V$ 特性曲线的扫描. 在超导结超导开启温度 T_c 下, 约瑟夫森效应区域出现零电压电流, 结的超导临界电流 I_c 随测量温度的升高而减小, 电流大小从 4.2 K 的 10.38 mA 减小到 29.2 K 的 0.21 mA. 当温度升到 $T_c = 34.2\text{ K}$ 以上, 结区的超导电流减小至零, $I-V$ 扫描曲线图呈现出电阻欧姆线性关系. 4.2 K 温度下隧道结的临界电流 I_c 对应的临界电流密度 j_c 约为 0.52 A/cm^2 . 相比于 Chen 等 [8] 制作势垒层厚度为

0.86 nm 的 $\text{MgB}_2/\text{MgO}/\text{MgB}_2$ 约瑟夫森结临界电流密度 275 kA/cm^2 小了很多. 主要是由于势垒层厚度增加了将近 12 倍, 根据 SIS 约瑟夫森结的超导临界电流密度 j_c 的大小与绝缘层厚度 d 呈指数关系, $j_c = j_0 \exp(d/d_0)$, 其中 $d_0 = \hbar/(8mE_b)^{1/2}$, \hbar 为约化普朗克常数, E_b 是势垒高度, 其值约为 0.8 eV, 其计算结果与本研究结果基本符合. 同时从图 3 中 4.2—14.2 K 的 $I-V$ 曲线可以清楚观察到回滞效应, 随着测试温度的增加, 回滞区域面积逐渐减小, 当温度升至 19.2 K 时, 回滞曲线消失. 根据约瑟夫森结的电阻电容分路结 (resistance capacitance shunted junction, RCSJ) 模型, $I-V$ 曲线回滞的条件是由麦克坎伯参量 $\beta_c = 2\pi I_c R^2 C / \Phi_0$ 决定, 其中 C 为结电容, I_c 为结临界电流, R 为结电阻, Φ_0 是磁通量. 当 $\beta_c > 1$ 时, 其结电流电压曲线出现回滞区域; 当 $\beta_c \ll 1$ 时, 回滞效应消失. 测试温度升高到 14.2 K 后, β_c 值随结临界电流 I_c 从 10.38 mA 减小到 4.7 mA 而变得小于等于 1, 结的回滞区域消失.

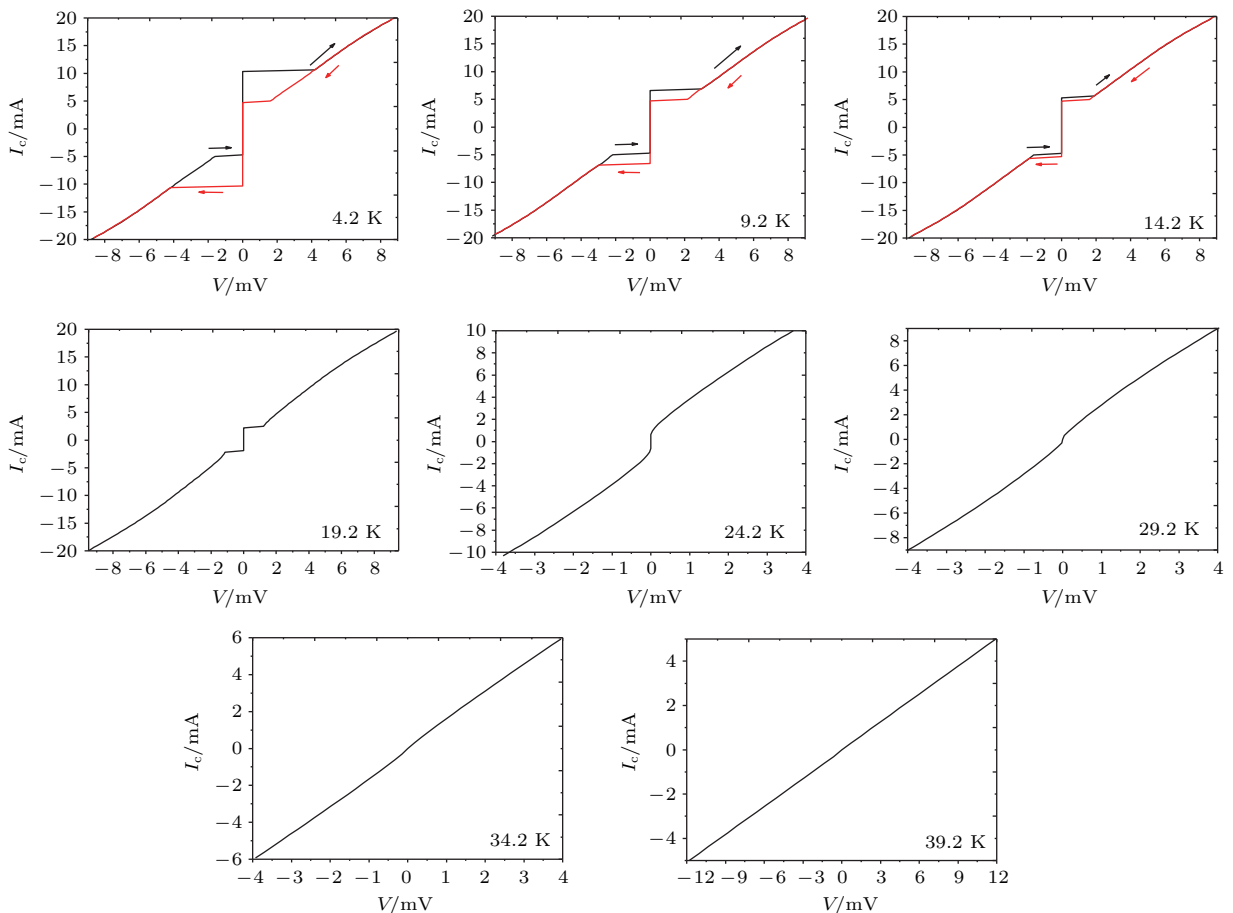


图 3 不同测量温度下 $\text{MgB}_2/\text{B}/\text{MgB}_2$ 约瑟夫森结的 $I-V$ 扫描曲线

Fig. 3. $I-V$ characteristics of $\text{MgB}_2/\text{B}/\text{MgB}_2$ Josephson junction at different temperature.

当 $0 < T < T_c$ 时, 超导 SIS 约瑟夫森结在 $0 < V < 2\Delta/e$ 范围内出现零电压隧道电流, 在 $V = 2\Delta/e$ 附近, 超导体能隙边缘以下的大量电子可向另一侧超导体能隙之上的空态隧穿, 因而隧道电流迅速增加, 从而利用 SIS 结的 $I-V$ 特性曲线求微分可以方便准确地测量超导体的能隙. 图 4(a) 所示为 4.2 K 温度下 $\text{MgB}_2/\text{B}/\text{MgB}_2$ 约瑟夫森结通过 $I-V$ 曲线微分处理获得的 $dI/dV-V$ 的关系曲线. 在 V 约为 ± 4.26 mV 附近出现了主电导特征峰, 对于同一材料的约瑟夫森结, 其所对应的电压值为 2 倍超导能隙值 ($2\Delta/e$). 由于所测试样为 $\text{MgB}_2/\text{B}/\text{MgB}_2$ 的约瑟夫森结, 从图 4(a) 中可以清楚观察到 $dI/dV-V$ 所显示的主要特征峰值为 $2\Delta_{\text{MgB}_2}$. 文献 [7] 研究表明, MgB_2 是双超导能带

材料, 圆柱状的空穴带, 能隙 Δ_σ 为 6.4—7.2 meV, 而 3D 的 π 带的能隙 Δ_π 为 1.2—3.7 meV. 本文应用 HPCVD 技术制备约瑟夫森结的顶层和底层 MgB_2 薄膜, 具有沿着 (0001) 方向生长的准单晶结构, 根据前期研究报道 [22], 高质量 C 轴取向的 MgB_2 薄膜的超导电流的 99% 来源于 3D 的 π 带. 因此, dI/dV 曲线中主电导特征峰呈现出 MgB_2 的 3D 带 π 能隙 Δ_π , 其值约为 2.13 meV. 另外, 直流偏压小于超导能隙 $2\Delta_\pi$ 范围内, 清晰地观察到多重 Andreev 反射的微分电导峰, 其微分电导峰的能隙值约为 $2\Delta_\pi/N$ ($N = 2, 3, 5$), 这是由于隧道中单电子隧穿到超导薄膜中形成电子对的超导电流, 从而发生多重 Andreev 反射 [23].

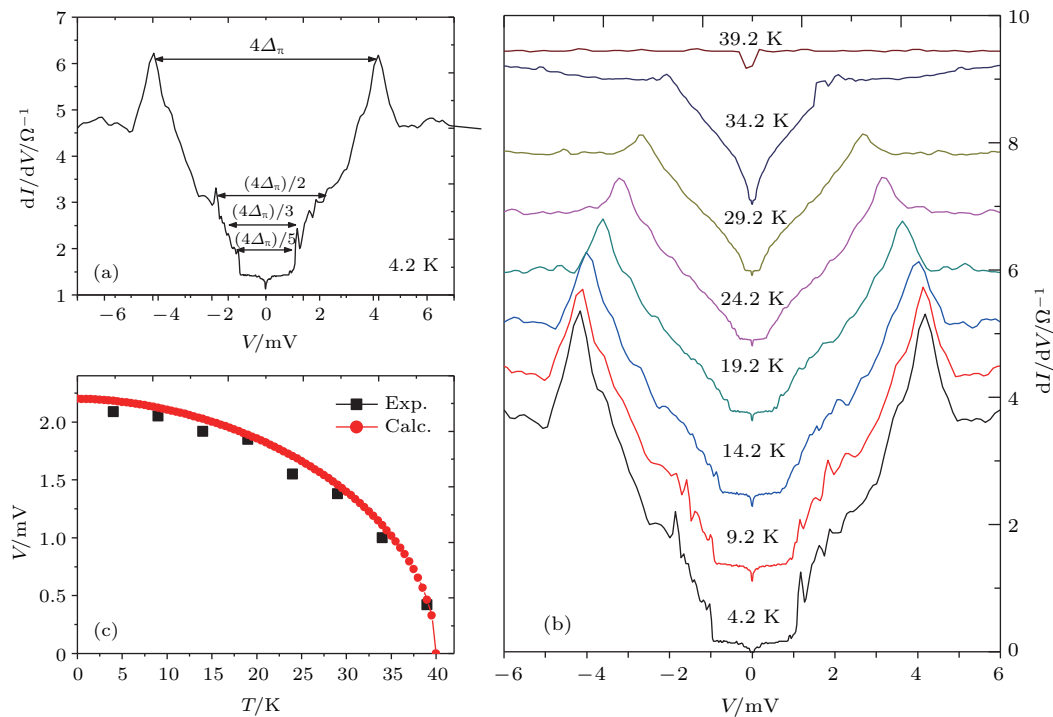


图 4 (a) 4.2 K 测量温度下 $\text{MgB}_2/\text{B}/\text{MgB}_2$ 约瑟夫森结的 $dI/dV-V$ 关系曲线; (b) 不同测量温度下超导结的 $dI/dV-V$ 关系曲线; (c) 不同温度下约瑟夫森结测量的超导能隙, 圆点连线为第一性原理计算得到的 MgB_2 超导能隙与温度关系曲线, 方块为实验测量数据

Fig. 4. (a) $dI/dV-V$ characteristics of the $\text{MgB}_2/\text{B}/\text{MgB}_2$ Josephson junction at 4.2 K; (b) $dI/dV-V$ characteristics of the $\text{MgB}_2/\text{B}/\text{MgB}_2$ Josephson junction at different temperature; (c) temperature dependence of superconducting gap voltage (Δ) for the junction. The dots line shows the calculated temperature dependence of Δ .

图 4(b) 显示了不同测量温度下约瑟夫森结样品的 $dI/dV-V$ 的关系曲线. 可以从图谱中观察到随着温度的升高, 关系曲线从“U”形向“V”形转变, MgB_2 能隙也随之减小. 第一性原理推算出超导能隙 Δ 与温度 T 的函数关系:

$\Delta(T) = \Delta(0) \times (1 - (T/T_c)^p)^{1/2}$, 对于 MgB_2 的 3D 带的能隙 Δ_π , $\Delta(0)$ 为 2.2 meV, p 系数为 1.8 [7], 得到了超导能隙图随温度变化的理论曲线, 如图 4(c) 圆点连线所示, 图 4(c) 中方块标记点为样品实验测试的拟合数据. 从图中看出, 在 T_c 附

近很宽的温度范围内, 理论结果与实验结果符合得很好. 根据约瑟夫森结的时钟响应极限频率 $f_g = \Delta/\Phi_0$ ($\Phi_0 \approx 483$ GHz/mV), 简单的超导金属 Nb 基 ($\Delta = 1.5$ meV) 单磁通量子 (rapid single flux quantum, RSFQ) 逻辑器件开启频率达到 770 GHz, 复杂电路也可以稳定工作在上百 GHz^[7]. 对于具有 6—7 meV 空穴筒状 σ 带能隙的 MgB₂ 约瑟夫森结超导逻辑器件时钟频率理论计算上可以达到约 3 THz. 尽管本文应用 HPCVD 工艺制备高质量 C 轴取向的 MgB₂ 超导薄膜主要呈现出较小的 3D 的 π 带能隙 Δ_π , 其值约为 2.13 meV, 在 4.2 K 温度下基于该 MgB₂/B/MgB₂ 的 RSFQ 逻辑器件开启频率也可以达到 1 THz. 根据 MgB₂ 超导能隙 Δ 与温度 T 的函数关系, 工作环境温度 20—30 K 范围内, 其超导能隙值约为 1.32—1.83 meV, 说明在该温区内可以达到或者超过目前 Nb 基超导逻辑器件 4.2 K 时的工作频率水平, 对于 MgB₂ 基超导电子技术的应用具有十分重要的意义.

4 结 论

采用 HPCVD 的 MgB₂ 薄膜制备技术和金属掩膜版工艺, 以 B 膜作为势垒层在单晶 Al₂O₃(0001) 基底上制作了介质层厚度为 10 nm 的三明治结构的 MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结. 在综合物性测量系统 (PPMS) 中应用标准四引线法对该超导结的 R - T 曲线和不同温度下直流 I - V 曲线进行了测量研究. 实验结果表明, 所制作的 MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结开启温度为 31.3 K, 4.2 K 时临界电流密度为 0.52 A/cm². 通过对直流特性 I - V 曲线的微分拟合, 清晰地观测到 MgB₂ 的 3D 带的能隙 Δ_π 为 2.13 meV. 本研究下一步工作计划将 MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结的介质层厚度 d 减小到 MgB₂ 的相干长度的程度, 以期达到铌基 SIC 临界电流密度 20 KA/cm² 的水平, 使 MgB₂/B/MgB₂ 约瑟夫森结超导电子器件能以百 GHz 时钟频率稳定工作在 20 K 以上的环境温度, 为 MgB₂ 超导薄膜材料在超导电子技术工业化应用中探索一套简单实用工艺方案.

参考文献

- [1] Likharev K K, Semenov V K 1991 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1** 3
- [2] Kameda Y, Yorozu S, Hashimoto Y, Terai H, Fujimaki A, Yoshikawa N 2005 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 423
- [3] Mukanov O A, Gupta D, Kadin A M, Semenov V K 2004 *Proc. IEEE* **92** 1564
- [4] Mukhanov O A 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 760
- [5] Brake H J M T, Wiegerinck G F M 2002 *Cryogenics* **42** 705
- [6] Chen W, Rylyakov A V, Patel V, Lukens J E 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 3212
- [7] Choi H J, Roundy D, Sun H, Louie S G 2002 *Nature* **418** 758
- [8] Chen K, Zhuang C G, Li Q, Weng X, Redwing J M, Xi X X 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 115
- [9] Shim H J, Yoon K S, Moodera J S, Hong J P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 212509
- [10] Singh R K, Gandikota R, Kim J, Newman N, Rowell J M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 042512
- [11] Kim T H, Moodera J S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 434
- [12] Cybart S A, Chen K, Cui Y, Li Q, Xi X X, Dynes R C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 012509
- [13] Ke Y Q, Zhou D F, Liu J, Zen M, Zhu H M, Zhang Y B 2009 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **31** 166 (in Chinese) [柯一青, 周迪帆, 刘珏, 曾敏, 朱红妹, 张义邴 2009 低温物理学报 **31** 166]
- [14] Xu Z 2014 *M. S. Thesis* (Lanzhou: University of Lanzhou) (in Chinese) [许壮 2014 硕士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [15] Zhou Z Y, Wang S, Yang F S, Yang J, Fu X H 2013 *Chin. J. Low Temp. Phys.* **35** 425 (in Chinese) [周章渝, 王松, 杨发顺, 杨健, 傅兴华 2013 低温物理学报 **35** 425]
- [16] Zhou Z Y, Wang S, Yang F S, Yang J, Fu X H 2013 *J. Funct. Mater.* **44** 893 (in Chinese) [周章渝, 王松, 杨发顺, 杨健, 傅兴华 2013 功能材料 **44** 893]
- [17] Bouquet F, Fisher R A, Phillips N E, Hinks D G, Jorgensen J D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 180
- [18] Kortus J, Mazin I I, Belashchenko K D, Antropov V P, Boyer L L 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4656
- [19] Zeng X H, Pogrebnikov A V, Zhu M H, Jones J E, Xi X X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2097
- [20] Rowell J M, Xu S Y, Zeng X H, Pogrebnikov A V, Li Q 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 102
- [21] Gross R, Chaudhari P, Dimos D, Gupta A, Koren G 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 228
- [22] Brinkman A, Golubov A A, Rogalla H, Dolgov O V, Kortus J, Kong Y, Jepsen O, Andersen O K 2002 *Phys. Rev. B* **65** 180517
- [23] Kleinsasser A W, Miller R E, Mallison W H, Arnold G B 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 1738

Preparation and DC characteristics of MgB₂/B/MgB₂ Josephson junctions*

Zhou Zhang-Yu^{1)3)†} Xiao Han²⁾ Wang Song¹⁾ Fu Xing-Hua¹⁾ Yan Jiang³⁾

1) (College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

2) (College of Chemistry and Environmental Science, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

3) (Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 20 April 2016; revised manuscript received 16 June 2016)

Abstract

Since the discovery of its superconductivity, magnesium diboride (MgB₂) has been identified as a promising superconductor to be used in Josephson junction devices due to its high transition temperature, large energy gap, long coherence length, and expected easier fabrication of Josephson junctions as compared with high temperature superconductors. The high-quality MgB₂ films and excellent tunnel barrier materials are the core elements for a Josephson junction. Here in this paper, all MgB₂ thin film tunnel junctions with B tunnel barriers are fabricated in situ on sapphire substrates and their tunneling characteristics re investigated. The experimental results indicate that the MgB₂/B/MgB₂ junctions exhibit good tunneling characteristics.

The deposition of the MgB₂/B/MgB₂ trilayer is carried out in a completely in situ process. The bottom and top MgB₂ layers are grown to a thickness of 100 nm by hybrid physical-chemical vapor deposition (HPCVD) technique at about 973 K and in 10² Pa Ar atmosphere on a single crystal Al₂O₃ (0001) substrate. The 35-nm-thick amorphous B insulator layer is deposited using chemical vapor deposition method at 723 K and in 10³ Pa pure Ar. In the process of the top MgB₂ layer deposition, the amorphous B reacts with Mg in Mg vapor, leading to its thickness decreasing to 10 nm. Square-shaped junctions each with a size of 4 mm × 5 mm are determined by the metallic mask method. The resistivity temperature (*R-T*) curves and the DC current-voltage (*I-V*) curves of the MgB₂/B/MgB₂ junctions at different temperatures are measured by the four-point probe method in the physical property measurement system (PPMS). The experimental results show excellent superconducting properties of the top and bottom superconductor with high *T_c* (above 39.5 K), appreciable *J_c* values (10⁷–10⁸ A/cm²). In the *I-V* characteristics of junction at temperatures ranging from 4.2 K to 39.2 K, the junctions exhibit clear Josephson tunneling characteristics with *j_c* ~ 0.52 A/cm² at 4.2 K, which remains nonzero up to 31.3 K. The hysteresis is pronounced at 4.2 K, becoming smaller as temperature increases, and eventually disappearing at around 19.2 K. By using the differential *I-V* curves, only π gap is observed in differential conductance vs. voltage characteristics (*dI/dV-V*) curves, because MgB₂ layer grown using HPCVD technique is always *c*-axis oriented and more than 99% contribution to the conduction is from π band charge carriers.

Keywords: MgB₂/B/MgB₂ Josephson junctions, metallic mask method, hybrid physics-chemistry vapor deposition

PACS: 03.75.Lm, 74.78.Fk, 74.81.Fa, 85.25.Hv

DOI: 10.7498/aps.65.180301

* Project supported by the Scientific Research Staring Foundation for the Doctor, Guizhou University, China (Grant No. (2013)18).

† Corresponding author. E-mail: zzy9404@sina.com