

Bi₂O₂Se 纳米线的生长及其超导量子干涉器件*

刘怀远^{1)2)#} 肖建飞^{1)2)#} 吕昭征¹⁾³⁾ 吕力^{1)2)3)†} 屈凡明^{1)2)3)‡}

1) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家研究中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049)

3) (合肥国家实验室, 合肥 230088)

(2023 年 10 月 5 日收到; 2023 年 11 月 27 日收到修改稿)

Bi₂O₂Se 是一种新型半导体材料, 具有载流子迁移率高、空气中稳定和自旋轨道耦合强等优点, 并且其合成方法多种多样, 应用范围十分广泛. 但已有研究大多集中在其二维薄膜, 本文介绍一种使用三温区管式炉通过化学气相沉积生长 Bi₂O₂Se 一维纳米线的方法, 研究了云母衬底处于水平方向不同位置以及竖直方向不同高度对 Bi₂O₂Se 纳米线生长的影响, 并归纳出适于其生长的优化条件. 之后, 基于生长的 Bi₂O₂Se 纳米线构建了超导量子干涉器件, 并观测到随磁场的超导量子干涉, 为拓宽 Bi₂O₂Se 纳米线的应用提供了思路.

关键词: Bi₂O₂Se 纳米线, 化学气相沉积, 超导量子干涉器

PACS: 78.67.Uh, 81.15.Gh, 85.25.-j

DOI: 10.7498/aps.73.20231600

1 引言

Bi₂O₂Se 是一种新型半导体材料, 具有高载流子迁移率^[1-4]、优异的空气稳定性^[1,4]和强自旋轨道耦合^[3,5,6]等特性, 越来越受到关注. 随着研究的不断深入, 在 Bi₂O₂Se 的合成方法、生长尺寸、应用等方面都有了探索. 对于 Bi₂O₂Se, 常见的生长方法包括化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD)^[1,2,7-10]、脉冲激光沉积 (pulsed laser deposition, PLD)^[10]、湿化学方法^[11]和物理气相沉积 (physical vapor deposition, PVD)^[12]等. 每种生长方法的特点不同, 由此产生的 Bi₂O₂Se 形态也不同, 包括 Bi₂O₂Se 纳米片^[1,2,4-7,13-15]、纳米带^[16-18]、晶体^[19]、颗粒^[20]、以及纳米线^[3,21]. Bi₂O₂Se 由于各

种优异的性能, 其应用范围包括技术应用和科学研究等. Bi₂O₂Se 已应用于场效应晶体管 (field effect transistor, FET)^[4,12,16,22-24]、红外光电探测器^[7,15,24]、半导体器件^[4]、异质结^[25]和自旋电子学^[23]等. 由于纳米线相对于纳米片具备更大的表面积体积比, 所以纳米线在栅极调控和强自旋轨道耦合等方面可能具有更大的优势, 而且这些性质在一些领域具有至关重要的作用. 但已有研究主要集中在 Bi₂O₂Se 的纳米薄片, 而对其一维纳米线的研究相对较少.

本文将介绍一种使用三温区管式炉通过 CVD 生长 Bi₂O₂Se 纳米线的方法, 并且研究云母衬底处于管式炉水平方向不同位置, 以及竖直方向不同高度, 对生长 Bi₂O₂Se 纳米线的影响, 归纳出适合生长的条件. 之后, 使用超导电极和 Bi₂O₂Se 纳米线构建超导量子干涉器件 (superconducting

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1403400)、国家自然科学基金 (批准号: 12074417, 92065203)、中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDB28000000, XDB33000000)、综合极端条件实验装置和科技创新 2030—“量子通信与量子计算机”重大项目 (批准号: 2021ZD0302600) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: liliu@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: fanmingqu@iphy.ac.cn

quantum interference device, SQUID), 并实现了超导邻近, 在磁场中观测到干涉图案, 为拓宽 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的应用提供了思路.

2 三温区管式炉生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线

2.1 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线简介

$\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 具有体心四方晶体结构, 强共价键的 $[\text{Bi}_2\text{O}_2]_n^{2n+}$ 层被具有相对较弱静电相互作用的平面 $[\text{Se}]_n^{2n-}$ 层夹在中间. 通常, $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 生长在云母 $[\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{F}_2]$ 衬底上. 云母是一种典型的非中性层状材料, 带正电的 $[\text{K}]^+$ 层被带负电的 $[\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{F}_2]$ 层分隔. $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线通过 $[\text{Se}]_n^{2n-}$ 层和 $[\text{K}]^+$ 层的静电吸引沉积生长. 本文采用三温区管式炉在云母衬底上通过 CVD 方法生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线. 相比于单温区管式炉, 三温区管式炉可以实现对不同温区的先后升温和分别控制, 从而允许对生长条件的更好调控. 将生长源 Bi_2Se_3 粉末和 Bi_2O_3 粉末放置在不同温区, 通过将 Bi_2Se_3 粉末提前达到蒸发温度, 从而先蒸发出来的 $[\text{Se}]_n^{2n-}$ 会优先到达云母衬底所在的位置, 并与云母中的 $[\text{K}]^+$ 通过静电相互作用沉积, 促进 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的生长, 这是三温区 CVD 管式炉的优势之一.

2.2 三温区 CVD 管式炉

图 1(a) 是三温区 CVD 管式炉的示意图. 该管式炉长 110 cm, 每个温区长 30 cm, 管式炉两侧分别有 7 cm 长的石棉, 如图 1(a) 两侧的粗矩形虚线框所示. 每两个温区之间用 3 cm 长的石棉隔开, 如图 1(a) 中间的细矩形虚线框所示. 该管式炉配有一根 140 cm 长、直径 2 in (1 in = 2.54 cm) 的石英管, 放置在管式炉内, 两侧分别延伸出 15 cm, 用于接入氩气和抽气泵. 含有 0.5 g 的 Bi_2Se_3 粉末的刚玉坩埚和含有 0.9 g 的 Bi_2O_3 粉末的刚玉坩埚分别放置在温区 A 和温区 C 的中央, 每个坩埚长

7 cm. 用于生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的云母衬底放置在 CVD 管式炉温区 C 的右边缘.

图 1(b), (c) 分别为生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线石英舟的示意图和光学照片. 半圆管形石英舟长 15 cm, 直径 4 cm (高 2 cm). 石英舟内为用于改变云母衬底高度的石英衬底和用于放置云母衬底的硅衬底, 每个石英衬底长 5 cm, 宽约 2.5 cm, 厚 1 mm; 硅衬底长约 10 cm, 宽约 2.5 cm, 厚 0.5 mm. 将 6 片新解理的云母衬底依次摆放在硅衬底上方, 每片云母为长宽均为 1 cm 的正方形. 图 1(c) 光学照片中右侧的乳白色物质为石棉. 从石英管的左侧入口引入氩气作为生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线时输送 Bi_2Se_3 源和 Bi_2O_3 源的载气, 流量为标准状况下 200 mL/min.

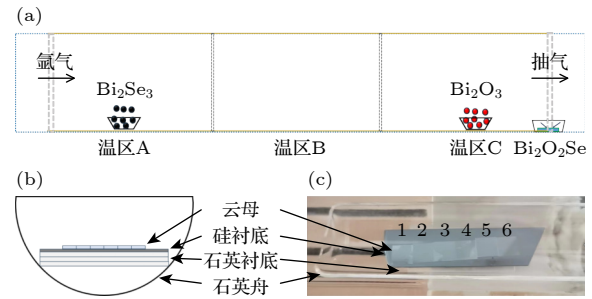


图 1 (a) 三温区管式炉的示意图, Bi_2Se_3 粉末放置在温区 A 的中央, Bi_2O_3 粉末放置在温区 C 的中央, 带有云母衬底的石英舟放置在管式炉的右边缘. (b), (c) 带有云母衬底的石英舟的示意图和光学照片

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the three-temperature-zone tubular furnace, with Bi_2Se_3 powder placed at the center of zone A and Bi_2O_3 powder at the center of zone C, a quartz boat with mica substrates is placed at the right edge of the quartz tube. (b), (c) Schematic diagram and optical photograph of a quartz boat with mica substrates, respectively.

2.3 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的生长步骤

表 1 列出了生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的具体流程. 第 1 步是在 5 min 内将 CVD 管式炉的三个温区的温度从室温升到 100 °C; 第 2 步是在 25 min 内将有 Bi_2Se_3 的温区 A 从 100 °C 升到 580 °C, 同时

表 1 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的生长步骤
Table 1. Growth steps of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ nanowires.

步骤		第1步	第2步	第3步	第4步
温区A (Bi_2Se_3)	温度/°C	室温—100	100—580	580	580—室温
	时间/min	5	25	30	—
温区B	温度/°C	室温—100	100—610	610	610—室温
	时间/min	5	30	25	—
温区C (Bi_2O_3)	温度/°C	室温—100	100—630	630	630—室温
	时间/min	5	30	25	—

在 30 min 内分别将温区 B 和放有 Bi_2O_3 的温区 C 从 100 °C 升到 610 °C 和 630 °C. 值得说明的是, 提前 5 min 将温区 A 升到 Bi_2Se_3 的蒸发温度, 使得 Bi_2Se_3 能够先到达云母衬底, 从而促进 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线或薄片的生长. 第 3 步是保持温度恒定, 温区 A 在 580 °C 保持 30 min, 温区 B 在 610 °C 保持 25 min, 温区 C 在 630 °C 保持 25 min. 第 4 步是将 CVD 管式炉自然冷却至室温. 当温度降至室温时, 可以取出样品进行后续实验.

3 云母衬底的水平位置和竖直高度对生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的影响

3.1 云母衬底在水平方向不同位置对生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的影响

下面讨论云母衬底处于水平方向不同位置对生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的影响. 图 2(a), (c), (e) 分别对应 2 号、4 号和 5 号云母衬底在生长后的 1000 倍光学显微镜照片, 图 2(b), (d), (f) 分别对应它们的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 照片. 其他位置云母衬底的光学显微镜照片和 SEM 照片见补充材料图 S1 (online). 由于 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线在云母衬底上竖直或倾斜向上生长, 纳米线的底端和云母衬底处于同一焦平面, 而顶端处于不同焦平面. 为了更好地显现 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线, 2 号和 5 号云母衬底的光学显微镜照片和 SEM 照片都以纳米线顶端为焦平面. 在光学显微镜照片

中, $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线显现为黑点或段, 如图 2(a), (e) 中红色圆圈所示. 在 SEM 照片中, $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的顶端相对亮, 而底端相对暗. 从这些图片可以归纳出云母衬底在水平方向的位置对生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的影响. 在 2 号云母衬底处, Bi_2Se_3 和 Bi_2O_3 的蒸气沉积在云母衬底上并生长出 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线, 如图 2(a) 中的黑点所示. 图 2(b) 为对应的 SEM 照片, $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线在云母衬底上倾斜向上生长, 同时可见悬立生长的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米薄片. 在 4 号云母衬底处, 可以看到密集的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米薄片, 如图 2(c) 及红色圆圈所示. 图 2(d) 为对应的 SEM 照片, 可见很多 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米片分布在云母衬底上. 在 5 号云母衬底处, 可以看到比 2 号衬底更密集的纳米线 (黑点), 如图 2(e) 所示, 可以推测 5 号衬底所在的位置可以生长更高密度的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线. 图 2(f) 为对应的 SEM 照片, $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线同样悬立生长, 同时可见衬底上的纳米薄片已几乎铺满, 以及少量悬立的纳米薄片. 2 号和 5 号云母衬底所处的位置是此 CVD 管式炉生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线较理想的位置.

3.2 云母衬底在竖直方向不同高度对生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的影响

下面讨论云母衬底在竖直方向的不同高度对生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的影响. 通过改变云母衬底下方石英衬底的数量改变云母衬底的竖直方向高度, 所选水平方向位置固定为 2 号衬底位置. 当石英衬

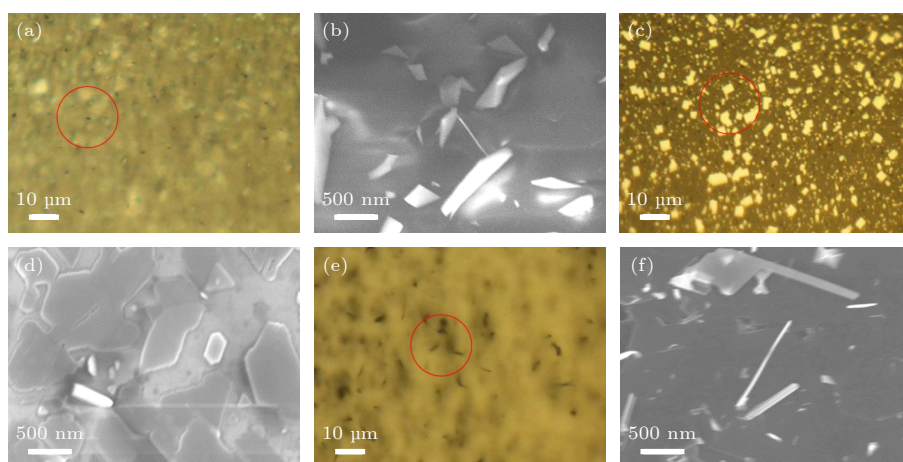


图 2 不同水平位置的云母衬底生长的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 光学显微镜照片和 SEM 照片 (a), (c), (e) 对应 2 号、4 号和 5 号云母衬底生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 后的光学显微镜照片; (b), (d), (f) 对应 2 号、4 号和 5 号云母衬底生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 后的 SEM 照片

Fig. 2. Optical microscope photos and SEM photos of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ grown on mica substrates at different horizontal positions: (a), (c), (e) Optical microscope photos of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ grown on mica substrates at positions No.2, No.4 and No.5, respectively; (b), (d), (f) SEM photos of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ grown on mica substrates at positions No.2, No.4 and No.5, respectively.

底的数量为 15 个时, 云母衬底基本与半圆管石英舟切口平齐. 图 3(a)–(c) 分别对应石英衬底数量为 1, 8, 13 个时在云母衬底上生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的 SEM 照片, 云母衬底距离半圆管石英舟切口分别约为 14, 7, 2 mm. 从图 3 可以看出 (更多照片未给出), 当云母衬底距离半圆管石英舟切口大概 7 mm 时, 生长的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的长度最长, 约 10 μm . 该竖直方向高度是此 CVD 管式炉最佳的生长位置. 在化学气相沉积生长中, 气流起着关键的作用. 比如, 在参考文献 [21] 中, 纳米线的生长长度和气流为湍流或层流有关, 通过使用小直径石英管可以在层流气流下生长较长的纳米线. 在我们的生长条件中, 改变云母衬底在石英舟中的竖直高度可以影响纳米线的生长长度, 估计这是由于局部的气流环境导致的, 具体分析请见补充材料 (online).

4 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的表征

通过以上介绍, 归纳了云母衬底在水平方向不同位置和竖直方向不同高度对生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的影响. 下面, 将对 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线进行基本的表征, 并与超导结合构建 SQUID.

我们生长的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线, 长度可达 10 μm 以上, 较窄的纳米线宽度大约在 100 nm, 厚度在 4–50 nm. 为了对 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线进行表征, 通过机械接触的办法将纳米线转移到 Si/SiO₂ 衬底上. 图 4(a), (b) 是 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 图, 可见其厚度大约为 4 nm. 图 4(c) 是一根较宽的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的能谱图 (energy dispersive spectrometer, EDS), 可见 Bi:O:Se 符合 2:2:1 的原子比.

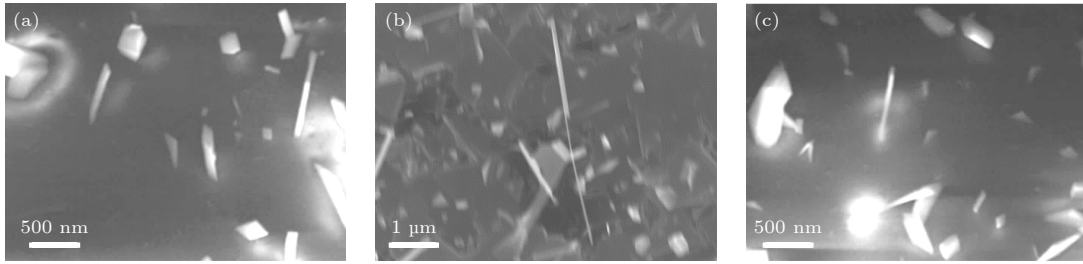


图 3 不同竖直高度的云母衬底生长的 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的 SEM 照片 (a)–(c) 石英衬底数量为 1 个、8 个和 13 个
Fig. 3. SEM photos of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ nanowires grown on mica substrates of different vertical heights: (a)–(c) There are 1, 8 and 13 quartz substrates, respectively.

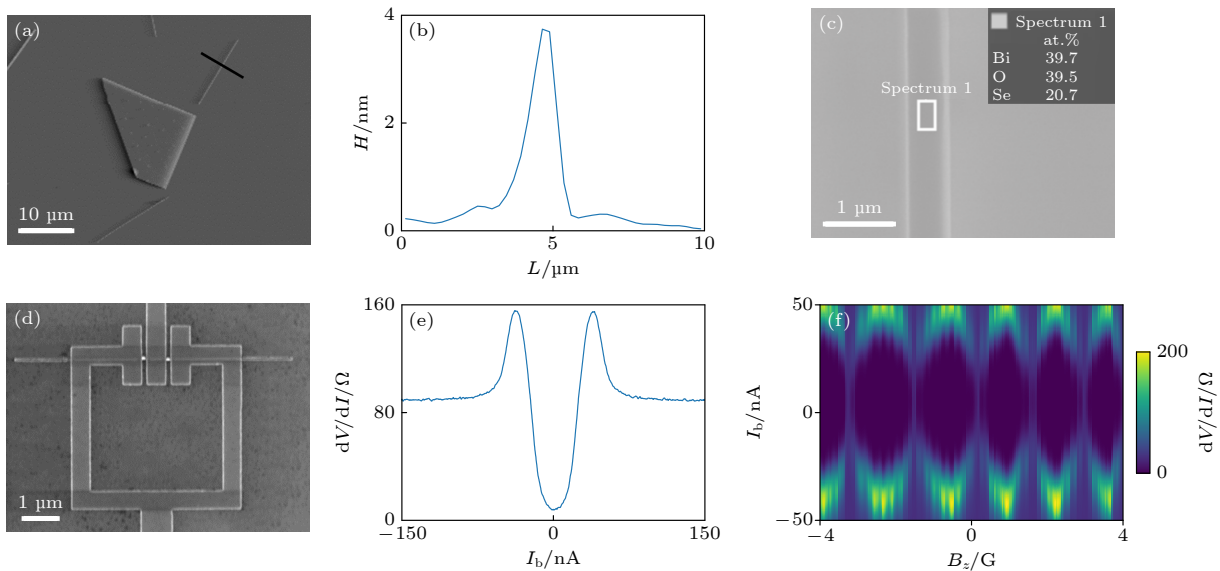


图 4 (a), (b) $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的 AFM 表征; (c) $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的 EDS 能谱; (d) 使用 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线制备的 SQUID 的 SEM 照片; (e) SQUID 的 $dV/dI-I_b$ 曲线; (f) SQUID 干涉图案
Fig. 4. (a), (b) AFM characterization of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ nanowire; (c) EDS spectra of $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ nanowire; (d) SEM images of SQUID device; (e) $dV/dI-I_b$ curve of SQUID; (f) SQUID interference pattern.

之后,对 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线与超导结合的器件进行了制备和表征. 此类具有强自旋轨道耦合的半导体材料与超导结合可以用来构建复合器件, 研究诸如超导二极管^[26]、约瑟夫森反常相位^[27,28]、拓扑量子器件^[29-31]等. 比如,在 InAs , InSb 等强自旋轨道耦合的半导体中研究了二极管、反常相位、马约拉纳束缚态等^[32-35],在强自旋轨道耦合的拓扑材料 Bi_2Se_3 , NiTe_2 等中同样有广泛研究^[36,37],但在 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 上的这类研究还很少. 作为这些研究的第一步,就是将超导电极制备到 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 上,实现超导邻近效应. 为此,进一步使用电子束光刻,结合电子束蒸镀钛/铝 (5/60 nm) 金属层,制备了 SQUID 器件,如图 4(d) 所示. 在蒸镀金属之前,使用氩气等离子体对 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 上与电极接触的区域进行清洁处理,以去除残留的聚甲基丙烯酸甲酯胶 (polymethyl methacrylate, PMMA). 低温输运测量是在稀释制冷机内约 10 mK 的温度下进行,使用了标准的低噪声锁相技术. 图 4(e) 展示了器件的零磁场下 $dV/dI-I_b$ 曲线,其中 dV 为测得的交流电压, dI 为施加的小幅度交流电流, I_b 为施加的直流偏置电流. 可以看出,超导临界电流大约为 40 nA,表明器件已经实现了超导邻近. 图 4(f) 是 dV/dI 对垂直磁场 B_z 和偏置电流 I_b 的依赖关系二维图,可以看出 SQUID 干涉振荡,周期约为 1.4 Gs,与器件的面积 $14 \mu\text{m}^2$ 一致. 需要指出的是,图 4(f) 的真实零磁场并未矫正;由于磁体剩磁和地磁场等影响,真实零磁场偏离了所加磁场零点 ($B_z = 0$). 以上表征表明 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线可以用于与超导结合的器件研究,考虑到其空气稳定性和强自旋轨道耦合等特性,在超导二极管^[26]、约瑟夫森反常相位^[27,28]、拓扑量子器件^[29-31]等方向具有应用前景.

5 总结和展望

本文使用三温区管式炉利用 CVD 方法生长了 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线,并且归纳了云母衬底的水平位置和竖直高度对生长 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米线的影响;制备了 SQUID 器件,实现了超导邻近并观测到超导量子干涉. $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 具备高迁移率、空气中稳定、强自旋轨道耦合等特性,而纳米线具有高的表面体积比和便利的调控性,有望在超导器件中得到广泛应用.

参考文献

- [1] Wu J X, Yuan H T, Meng M M, Chen C, Sun Y, Chen Z Y, Dang W H, Tan C W, Liu Y J, Yin J B, Zhou Y B, Huang S Y, Xu H Q, Cui Y, Hwang H Y, Liu Z F, Chen Y L, Yan B H, Peng H L 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 530
- [2] Wu J, Tan C, Tan Z, Liu Y, Yin J, Dang W, Wang M, Peng H 2017 *Nano Lett.* **17** 3021
- [3] Zhao K, Liu H, Tan C, Xiao J, Shen J, Liu G, Peng H, Lu L, Qu F 2022 *Appl. Phys. Lett.* **121** 212104
- [4] Wu J X, Liu Y J, Tan Z, Tan C, Yin J B, Li T, Tu T, Peng H 2017 *Adv. Mater.* **29** 1704060
- [5] Meng M M, Huang S Y, Tan C, Wu J X, Jing Y, Peng H, Xu H Q 2018 *Nanoscale* **10** 2704
- [6] Meng M M, Huang S Y, Tan C, Wu J X, Li X, Peng H, Xu H Q 2019 *Nanoscale* **11** 10622
- [7] Li J, Wang Z, Wen Y, Chu J, Yin L, Cheng R, Lei L, He P, Jiang C, Feng L, He J 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1706437
- [8] Xu S, Fu H, Tian Y, Deng T, Cai J, Wu J, Tu T, Li T, Tan C, Liang Y, Zhang C, Liu Z, Liu Z, Chen Y, Jiang Y, Yan B, Peng H 2020 *Angew. Chem. Int. Ed.* **59** 17938
- [9] Hong C Y, Tao Y, Nie A M, Zhang M H, Wang N, Li R P, Huang J Q, Huang Y Q, Ren X M, Cheng Y C, Liu X L 2020 *ACS Nano* **14** 16803
- [10] Song Y, Li Z, Li H, Tang S, Mu G, Xu L, Peng W, Shen D, Chen Y, Xie X, Jiang M 2020 *Nanotechnology* **31** 165704
- [11] Ghosh T, Samanta M, Vasdev A, Dolui K, Ghatak J, Das T, Sheet G, Biswas K 2019 *Nano Lett.* **19** 5703
- [12] Khan U, Luo Y, Tang L, Teng C, Liu J, Liu B, Cheng H M 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1807979
- [13] Wu Z, Liu G L, Wang Y X, Yang X, Wei T Q, Wang Q J, Liang J, Xu N, Li Z Z, Zhu B, Qi H S, Deng Y, Zhu J 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1906639
- [14] Liu S, Tan C, He D, Wang Y, Peng H, Zhao H 2020 *Adv. Optical Mater.* **8** 1901567
- [15] Zou X, Sun Y, Wang C 2022 *Small Methods* **6** 2200347
- [16] Khan U, Nairan A, Khan K, Li S, Liu B, Gao J 2022 *Small* **19** 2206648
- [17] Khan U, Tang L, Ding B, Yuting L, Feng S, Chen W, Khan M J, Liu B, Cheng H M 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2101170
- [18] Yu J, Sun Q 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 053901
- [19] Mao Q, Geng X, Yang J, Zhang J, Zhu S, Yu Q, Wang Y, Li H, Li R, Hao H 2018 *J. Cryst. Growth.* **498** 244
- [20] Kim M, Park D, Kim J 2021 *J. Alloy. Compd.* **851** 156905
- [21] Li J, Wang Z, Chu J, Cheng Z, He P, Wang J, Yin L, Cheng R, Li N, Wen Y, He J 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 151104
- [22] Bluhm H, Foletti S, Neder I, Rudner M, Mahalu D, Umansky V, Yacoby A 2010 *Nat. Phys.* **7** 109
- [23] Quhe R, Liu J, Wu J, Yang J, Wang Y, Li Q, Li T, Guo Y, Yang J, Peng H, Lei M, Lu J 2019 *Nanoscale* **11** 532
- [24] Yin J, Tan Z, Hong H, Wu J, Yuan H, Liu Y, Chen C, Tan C, Yao F, Li T, Chen Y, Liu Z, Liu K, Peng H 2018 *Nat. Commun.* **9** 3311
- [25] Fan C, Dai B, Liang H, Xu X, Qi Z, Jiang H, Duan H, Zhang Q 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2010263
- [26] Jiang K, Hu J 2022 *Nat. Phys.* **18** 1145
- [27] Mayer W, Dartiaillh M C, Yuan J, Wickramasinghe K S, Rossi E, Shabani J 2020 *Nat. Commun.* **11** 212
- [28] Fukaya Y, Tanaka Y, Gentile P, Yada K, Cuoco M 2022 *npj Quantum Mater.* **7** 99
- [29] Jiang D, Yu D Y, Zheng Z, Cao X C, Lin Q, Liu W M 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 160302
- [30] Frolov S M, Manfra M J, Sau J D 2020 *Nat. Phys.* **16** 718
- [31] Breunig O, Ando Y 2021 *Nat. Rev. Phys.* **4** 184
- [32] Matsuo S, Imoto T, Yokoyama T, Sato Y, Lindemann T, Gronin S, Gardner G C, Manfra M J, Tarucha S 2023 *Nat.*

Phys. **19** 1636

- [33] Mourik V, Zuo K, Frolov S M, Plissard S R, Bakkers E P A M, Kouwenhoven L P **2012** *Science* **336** 1003
- [34] Dvir T, Wang G, van Loo N, Liu C X, Mazur G P, Bordin A, ten Haaf S L D, Wang J Y, van Driel D, Zatelli F, Li X, Malinowski F K, Gazibegovic S, Badawy G, Bakkers E P A M, Wimmer M, Kouwenhoven L P **2023** *Nature* **614** 445
- [35] Deng M T, Vaitiekėnas S, Hansen E B, Danon J, Leijnse M, Flensberg K, Nygård J, Krogstrup P, Marcus C M **2016**

Science **354** 1557

- [36] Pal B, Chakraborty A, Sivakumar P K, Davydova M, Gopi A K, Pandeya A K, Krieger J A, Zhang Y, Date M, Ju S, Yuan N, Schröter N B M, Fu L, Parkin S S P **2022** *Nat. Phys.* **18** 1228
- [37] Chen A Q, Park M J, Gill S T, Xiao Y R, Reigi-Plessis D, MacDougall G J, Gilbert M J, Mason N **2018** *Nat. Commun.* **9** 3478

Growth of Bi₂O₂Se nanowires and their superconducting quantum interference devices^{*}

Liu Huai-Yuan^{1)2)#} Xiao Jian-Fei^{1)2)#} Lü Zhao-Zheng¹⁾³⁾

Lü Li^{1)2)3)†} Qu Fan-Ming^{1)2)3)‡}

1) (*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China*)

(Received 5 October 2023; revised manuscript received 27 November 2023)

Abstract

Bi₂O₂Se is a new type of semiconductor material, which has the advantages of high carrier mobility, air stability, strong spin-orbit coupling, etc. It has a variety of synthesis methods and a wide range of applications. In the past few years, many explorations have been made in the synthesis, large-size growth, and applications of Bi₂O₂Se. It has been applied to field effect transistors, infrared photodetectors, semiconductor devices, heterojunctions, spin electronics, etc. Since nanowire has a larger surface area-to-volume ratio than nano-film, nanowire may have greater advantages in gate regulation and strong spin-orbit coupling, and these properties can play a crucial role in certain fields. However, most of the studies focused on its two-dimensional films, and there are less researches of its one-dimensional counterpart. In this work, a method of growing Bi₂O₂Se one-dimensional nanowires by chemical vapor deposition in a three-temperature-zone tubular furnace is introduced. High-quality suspended Bi₂O₂Se nanowires are obtained. In addition, the effects on the Bi₂O₂Se nanowire growth of the position of the mica substrates, i.e, different horizontal positions and vertical heights in the quartz boat, are studied, and the optimal conditions for the growth are summarized. The nanowires are characterized by atomic force microscope and energy dispersive spectrometer to show the information about the size and component. Then, superconducting quantum interference device based on the Bi₂O₂Se nanowires is constructed, and the superconducting quantum interference in a magnetic field is observed, which provides a way to broaden the application of Bi₂O₂Se nanowires.

Keywords: Bi₂O₂Se nanowires, chemical vapor deposition, superconducting quantum interference devices

PACS: 78.67.Uh, 81.15.Gh, 85.25.-j

DOI: 10.7498/aps.73.20231600

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFA1403400), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12074417, 92065203), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant Nos. XDB28000000, XDB33000000), the Synergetic Extreme Condition User Facility sponsored by the National Development and Reform Commission, and the Innovation Program for Quantum Science and Technology, China (Grant No. 2021ZD0302600).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: lilu@iphy.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: fanmingqu@iphy.ac.cn



Bi₂O₂Se纳米线的生长及其超导量子干涉器件

刘怀远 肖建飞 吕昭征 吕力 屈凡明

Growth of Bi₂O₂Se nanowires and their superconducting quantum interference devices

Liu Huai-Yuan Xiao Jian-Fei Lü Zhao-Zheng Lü Li Qu Fan-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 047803 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231600

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231600>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低功耗、高灵敏的Bi₂O₂Se光电导探测器

Bi₂O₂Se photoconductive detector with low power consumption and high sensitivity

物理学报. 2020, 69(24): 248502 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201044>

硅基底上二维硒氧化铋的化学气相沉积法合成及其光电探测应用

Synthesis of two-dimensional Bi₂O₂Se on silicon substrate by chemical vapor deposition and its photoelectric detection application

物理学报. 2022, 71(16): 166101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220388>

外电场辅助化学气相沉积方法制备网格状β-Ga₂O₃纳米线及其特性研究

Growth and characterization of grid-like β-Ga₂O₃ nanowires by electric field assisted chemical vapor deposition method

物理学报. 2018, 67(21): 218101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180805>

MgO衬底上YBa₂Cu₃O₇台阶边沿型约瑟夫森结的制备及特性

Fabrication and characterization of YBa₂Cu₃O₇ step-edge Josephson junctions on MgO substrate for high-temperature superconducting quantum interference devices

物理学报. 2021, 70(3): 037401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201291>

化学气相沉积石墨烯薄膜的洁净转移

Clean transfer of chemical vapor deposition graphene film

物理学报. 2019, 68(9): 096801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190279>

基于化学气相沉积方法的石墨烯-光子晶体光纤的制备研究

Synthesis of photonic crystal fiber based on graphene directly grown on air-hole by chemical vapor deposition

物理学报. 2020, 69(19): 194202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200750>