

Bi(110)薄膜在NbSe<sub>2</sub>衬底上的扫描隧道显微镜研究

刘建宇 孙昊桦 管丹丹 李耀义 王世勇 刘灿华 郑浩 贾金锋

Scanning tunneling microscopy research of Bi(110) thin films grown on NbSe<sub>2</sub>

Liu Jian-Yu Sun Hao-Hua Guan Dan-Dan Li Yao-Yi Wang Shi-Yong Liu Can-Hua Zheng Hao  
Jia Jin-Feng

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 170701 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180977

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180977>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I17>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于 GaN 同质衬底的高迁移率 AlGaN/GaN HEMT 材料](#)

Highmobility AlGaN/GaN high electronic mobility transistors on GaN homo-substrates

物理学报.2018, 67(7): 076801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172581>

[多层纳米 AlGaIn 薄膜制备及其场发射性能](#)

Preparations and field emission properties of multilayer AlGaIn nanofilm

物理学报.2016, 65(23): 236803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.236803>

[基底表面纳米织构对非晶四面体碳膜结构和摩擦特性的影响研究](#)

Effect of ion-beam surface modification technology on the variation of surface texture

物理学报.2015, 64(3): 036801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.036801>

[纳米 FePt 颗粒: MgO 多层复合薄膜的外延生长、微观结构与磁性研究](#)

Epitaxial growth micro-structure and magnetic studies of FePt nanoparticles: MgO multi-layer composite thin films

物理学报.2014, 63(16): 166801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.166801>

[硅油基底上受限金属薄膜自组装褶皱的原子力显微镜研究](#)

Atomic force microscopy studies on self-organized wrinkles in constrained metallic films deposited on silicone oil substrates

物理学报.2014, 63(11): 116801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.116801>

Bi(110)薄膜在NbSe<sub>2</sub>衬底上的扫描隧道显微镜研究\*

刘建宇<sup>1)</sup> 孙昊桦<sup>1)</sup> 管丹丹<sup>1)2)</sup> 李耀义<sup>1)2)</sup> 王世勇<sup>1)2)</sup>  
刘灿华<sup>1)2)</sup> 郑浩<sup>1)2)</sup> 贾金锋<sup>1)2)†</sup>

1) (上海交通大学物理与天文学院, 人工结构及量子调控教育部重点实验室, 上海 200240)

2) (人工微结构科学与技术协同创新中心, 南京 210093)

(2018年5月18日收到; 2018年5月31日收到修改稿)

二维拓扑绝缘体因其特殊的能带结构带来的新奇物理性质, 成为近年来凝聚态物理的研究热点. 尤其是在引入超导电性之后, 二维拓扑绝缘体中可能存在马约拉纳费米子 (Majorana fermion), 因此在量子计算方面具有重大应用前景. 在 Bi(111) 薄膜被证实为二维拓扑绝缘体之后, Bi(110) 薄膜引起了广泛关注, 然而其拓扑性质还存在争议. 本文利用分子束外延技术在室温低生长速率环境下成功制备出了高质量的单晶 Bi(110) 薄膜. 通过扫描隧道显微镜测量发现, 薄膜以约 8 个原子层厚度为分界, 从双层生长转变为单层生长模式. 结合隧道谱测量发现, 在 NbSe<sub>2</sub> 衬底上生长的 Bi(110) 薄膜因为近邻效应而具有明显的超导性质, 但并未显示出拓扑边缘态的存在. 此外, 对薄膜中特殊的量子阱态现象也进行了讨论.

**关键词:** 铋薄膜, 拓扑绝缘体, 近邻效应, 量子阱态

**PACS:** 07.79.Cz, 68.37.-d, 68.55.-a, 68.65.Fg

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180977

## 1 引言

自从 HgTe/CdTe 量子阱在实验上<sup>[1]</sup>验证了理论预言<sup>[2]</sup>, 成为首个被证实的二维拓扑绝缘体材料<sup>[3-5]</sup>以来, 能带反转导致的非平庸拓扑态已成为凝聚态领域研究的热点. 除了可实现量子自旋霍尔效应<sup>[3,6]</sup>之外, 拓扑绝缘体也可以通过掺杂磁性元素实现量子反常霍尔效应<sup>[7]</sup>, 还可以通过近邻效应<sup>[8]</sup>引入超导电性, 形成人工 p 波超导体从而实现马约拉纳费米子 (Majorana fermion)<sup>[9,10]</sup>等特殊性质.

自从自由 Bi(111) 薄膜是二维拓扑绝缘体的理论预言出现<sup>[11,12]</sup>, 关于 Bi 薄膜的研究自然而然地成为了焦点. 电输运测量实验<sup>[13]</sup>证明 Bi(111) 薄膜会随着厚度的变化出现从半金属到半导体的相变. 而后在 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 衬底上生长的双原子层

(bilayer, BL) 厚度的 Bi(111) 样品上, 运用角分辨光电电子能谱 (angle resolved photoemission spectroscopy, ARPES) 和扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscope, STM) 手段, 发现了拓扑边缘态存在的迹象<sup>[14,15]</sup>. 但由于衬底是拓扑绝缘体, 一定程度上会影响到 Bi 薄膜的边缘态性质, 从而边缘态的来源存在争议. 直到近期在以 NbSe<sub>2</sub> 为衬底生长的 Bi(111) 薄膜中, STM 实验才充分证实了其拓扑非平庸相的存在<sup>[16]</sup>. 与此同时, 关于 Bi(110) 薄膜的研究也在持续进行. 2011 年 Wada 等<sup>[17]</sup>对 Bi(110) 薄膜的性质进行了理论研究, 认为 1 BL 的薄膜为普通的绝缘体. 但在 2015 年却有实验表明, 1 BL (以及 2 BL) 厚度的 Bi(110) 薄膜存在拓扑边缘态<sup>[18]</sup>. 基于以上矛盾, 关于 Bi(110) 薄膜的拓扑性质还有待进一步的考证.

本文利用分子束外延生长技术, 在室温低速

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2016YFA0301003, 2016YFA0300403)、国家自然科学基金 (批准号: 11521404, 11634009, U1632102, 11504230, 11674222, 11574202, 11674226, 11574201, U1632272, 11655002) 和上海市科学技术委员会 (批准号: 16DZ2260200) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jfjia@sjtu.edu.cn

率条件下,使用常规超导体NbSe<sub>2</sub>作为衬底,成功制备出了不同厚度的高质量Bi(110)薄膜;并运用STM观测样品表面的形貌和电子特性. STM形貌图分析发现, Bi(110)薄膜厚度较薄时,以双层厚度模式(BL by BL)生长;当厚度较厚时,以单层厚度模式生长(monolayer by monolayer, ML by ML);并根据生长条件估计出,生长模式的转变大约发生在4 BL. 结合扫描隧道谱(scanning tunneling spectroscopy, STS)测量,无论ML或BL厚度的Bi(110)薄膜均未显示出边缘态的存在,符合其拓扑平庸的理论预言<sup>[17]</sup>. 除此之外, STS数据也证实了该样品中量子阱态和超导电性的存在.

## 2 薄膜生长

首先在超高真空腔外,将化学气相输运法制备的NbSe<sub>2</sub>小薄片用导电胶黏在2 mm × 10 mm的N型Si片中央. 在NbSe<sub>2</sub>表面用绝缘胶垂直地粘上一根细陶瓷棒,并于180 °C温度下加热30 min使其固定. 2 × 10<sup>-10</sup> Torr (1 Torr ≈ 133.322 Pa)以下的超高真空环境下,通过传杆撞击,打落陶瓷棒,解理出平整的NbSe<sub>2</sub>(001)表面用作衬底.

然后将提前预热好的Bi源(450 °C, 99.999%纯度)打开,向NbSe<sub>2</sub>衬底蒸镀Bi原子,形成外延薄膜. 本文所有实验均在衬底温度为室温(约24 °C), Bi源生长速度较低(约0.33 BL/min)的条件下生长Bi膜. 生长时间为8—15 min不等.

使用传样杆将生长出来的样品传入STM腔,利用电化学腐蚀处理过的钨针尖进行表面观测以及电子态的表征. 电压加在样品上,针尖接地,结合反馈回路,在恒流模式下获得STM表面形貌信息. 运用锁相放大技术获得STS数据,使用的调制电压信号是5 mV,频率为991 Hz.

通过往杜瓦中灌入液氮或液氦以实现77或4.2 K的低温环境. 对于样品的退火处理需要重新将样品传入MBE腔加热或者等待自然升温. 整个生长测试过程保持在超高真空环境(7 × 10<sup>-10</sup> Torr以下)进行.

## 3 实验数据讨论

Bi(110)薄膜为赝四方结构,其俯视图(top view)和侧视图(side view)如图1(a)所示. 每个原胞中含有两种不等价的Bi原子,两原子之间存

在一定的翘曲(约为0.21 Å),面内晶格常数分别为4.75 Å和4.54 Å,层间距为3.28 Å. 图1(b)所示为一块生长了15 min的Bi(110)样品的反射式高能电子衍射图像,由图中清晰的条纹可判断出其拥有良好的薄膜质量和平整的表面形貌. 对于这一样品,STM的表面形貌(图1(c))显示,在最上面的几层Bi(110),以长条状模式大面积存在,并且取向一致向右下方,宽度大多在25—30 nm之间. 图3(d)中可以看到条状结构的表面很平整,边缘也很整齐. 以红色直线为基准做高度图(如图3(e)所示),Bi(110)薄膜底层台阶的高度为680 pm,顶层台阶的高度均为340 pm. 根据Bi体材料*c*方向晶格常数,两种台阶相应的确定为BL和ML. 其中BL的厚度值也与之之前报道的高温生长条件下的Bi(110) BL层厚一致<sup>[16]</sup>. 图1(f)为图1(d)中黑色方框内的原子像结构,其中红色和紫色的圆球对应于Bi(110)的两种不等价原子,显示出清晰的赝四方结构.

实验中发现底层薄膜(或薄膜厚度较薄时)Bi(110)均以BL厚度薄膜形式存在;在较厚薄膜的顶层,Bi(110)以ML厚度薄膜形式存在. 因此,在Bi(110)薄膜生长过程中,应当存在从BL by BL模式到ML by ML模式的变化,发生该转变的临界厚度是一个重要参量. 然而在实际观测中发现,Bi(110)薄膜在NbSe<sub>2</sub>衬底上具有非常好的覆盖度. 尤其是在生长多层的情况下,很难寻找到裸露的NbSe<sub>2</sub>衬底表面,难以直接定义薄膜层数. 因此本实验通过控制薄膜生长时间和生长速度,并与薄膜测量相结合,来估计临界厚度. 以0.33 BL/min的速率生长12 min,对应的Bi的总量约为4 BL时,通过STM研究发现,主要在第4个BL表面开始出现ML厚度的Bi(110)薄膜. 当生长时间延长至15 min时(如图1(e)),对应总量约为5 BL,样品在BL高度的台面上存在多层并且每层均为ML厚度的Bi(110)薄膜. 进一步将生长时间延长至20 min时,STM形貌图只能观测到顶层薄膜,发现每层的厚度均为ML厚度. 由此可以估计,在NbSe<sub>2</sub>衬底上室温低速率的生长,在前4 BL主要是双层生长模式,在4 BL之后转变为单层生长模式.

Bi(110)薄膜生长模式的转变可以作如下理解. 此前有基于第一性原理的表面能计算<sup>[19,20]</sup>,其结果显示Bi(110)表面能随着薄膜厚度变化存在明显的奇偶层振荡,在偶数层(这里以ML计)其表面能

较低,但随着厚度的增加,奇偶层之间的能量差距越来越小.这就解释了当Bi(110)薄膜厚度较薄时,只存在偶数层(BL),直到8 ML厚度(即4 BL)之

后,奇偶层之间的能量差已经可以忽略,薄膜不再只以偶数层为稳定状态存在,因此转变为ML厚度的生长模式.

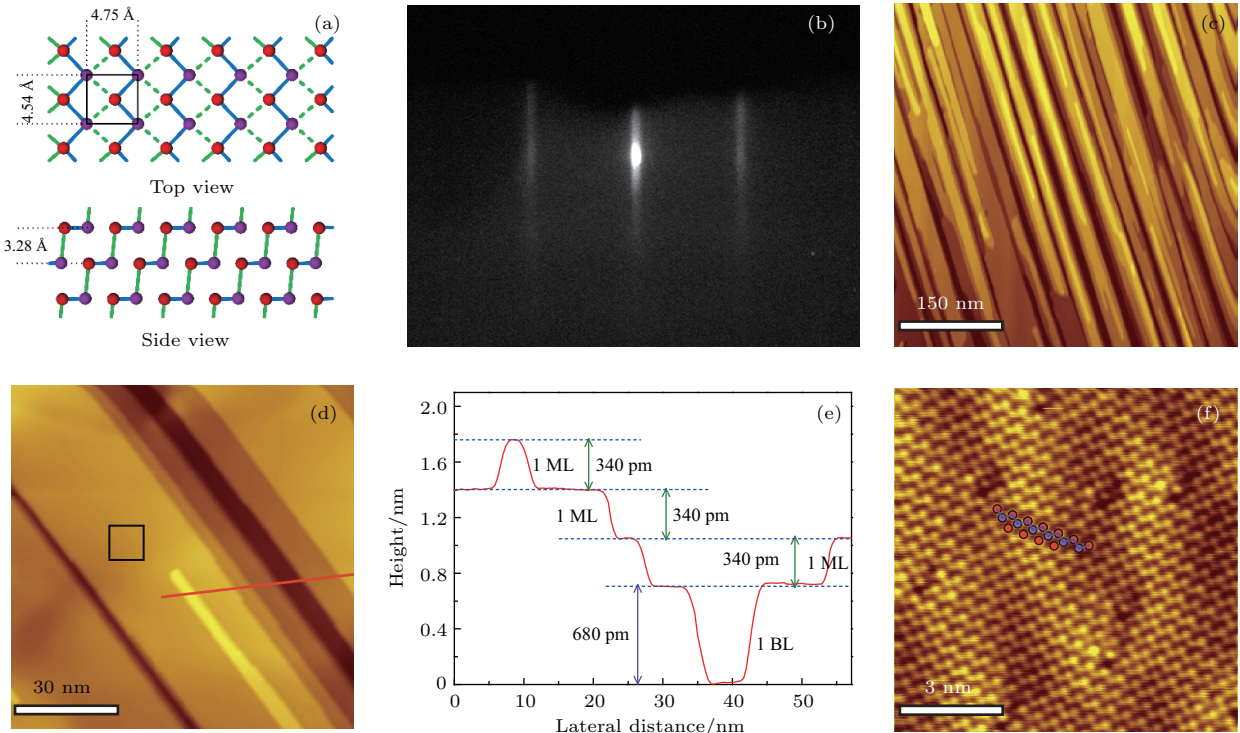


图1 Bi(110)薄膜的结构以及形貌特征 (a) Bi(110)相的晶格结构示意图,上方为面内结构(top view),下方为面外结构(side view);(b) NbSe<sub>2</sub>衬底上生长15 min Bi的反射高能电子衍射图;(c) 500 nm × 500 nm的形貌示意图, V<sub>S</sub> = 1.09 V, I = 102 pA; (d) 小范围STM形貌示意图 100 nm × 100 nm, V<sub>S</sub> = 1.18 V, I = 114 pA; (e) 为基于(d)中红色线条上的薄膜高度示意图, 680 pm为一个BL高度, 340 pm为一个ML高度; (f) 图(d)中黑色方框部分的原子像结构图,大小为10 nm × 10 nm, V<sub>S</sub> = 7.06 mV, I = 99 pA, 图中红色和紫色圆球标注其为Bi(110)相

Fig. 1. Atomic structure and surface morphology of Bi(110) thin films: (a) Schematic illustration of Bi(110) atomic structure for top view and side view; (b) the reflection high-energy electron diffraction pattern of Bi/NbSe<sub>2</sub> deposited for 15 min; (c) the morphology of a 500 nm × 500 nm area, V<sub>S</sub> = 1.09 V, I = 102 pA; (d) the morphology of a 100 nm × 100 nm area, V<sub>S</sub> = 1.18 V, I = 114 pA; (e) the height schematic over the red line in (d), 680 pm is a BL height while 340 pm is a ML height; (f) the atomic image of the black square section in (d), scare 10 nm × 10 nm, V<sub>S</sub> = 7.06 mV, I = 99 pA. The red and purple balls represent two different Bi atoms which indicates the Bi(110) phase.

值得一提的是,之前报道的高衬底温度下生长的Bi薄膜,(110)取向的薄膜并不能稳定存在.具体而言,高于2 BL之后,再生长的薄膜转变为(111)取向.本文采取室温生长,低速率下的Bi原子在单位时间内沉积量少,又无法获得足够的动能超越势垒,因此能继续保持为Bi(110)的生长模式.然而,当将一块生长15 min的样品,长时间放置在室温真空腔中之后(约12 h),通过STM可发现,所有的可见范围全部变为Bi(111)取向.而Bi(111)的薄膜也有类似与Bi(110)的长条形生长,但是台面更宽,边缘也不规则.这说明Bi(111)的形成是室温下获得动能从Bi(110)相自发转变而成,室温下更倾向于Bi(111)相的稳定存在<sup>[21,22]</sup>.

为了确认其拓扑性质,实验对边缘态的存在与否做了测试(由于在薄膜较厚时,无法通过沉积量来判断具体层数,因此对于选取区域采取自上而下的层数命名方式.测量区域最上层的ML为1st ML,最上层的BL为1st BL,以此类推.并对测量数据附加序号便于分辨).如图2(a)所示,在一块连续两个ML层厚的样品表面,于1st ML, 1st ML Edge以及2nd ML上取点测谱,分别以紫色,蓝色以及红色表示(如图2(b)),测量范围从-2.5—1.5 V,温度为77 K.图2(d)为一处由顶层1 ML和下层2 BL结构组成的薄膜区域.在这三个不同层厚的表面取点测谱,依次用紫色、红色、蓝色和墨绿色表示(如图2(e)).局域态密度的测量在液

氦(4.2 K)的温度下测量,测谱范围为 $-1-1$  V.

由图2(c)可知,第一层ML台面及台阶边缘的STS( $dI/dV$ )整体的峰位和强度都很一致,并没有检测到边缘态的存在.而图2(f)中,在2nd BL的台面上以及2nd BL edge的台阶边缘处,其STS局域态密度分布也几乎相同.因而,本实验在ML和BL的不同层厚Bi(110)薄膜上都未观测到拓扑表面态的存在.

现有样品的STS测量结果显示了Bi(110)薄膜一些值得注意的性质.如图3(a)所示,紫色谱线

(1st ML)约在 $-413$ ,  $-937$ ,  $-1450$ 和 $-1970$  mV能量下存在明显峰位.而红色谱线(2nd ML)的明显峰位则是约在 $-716$ ,  $-1220$ ,  $-1735$ 和 $-2230$  mV能量上.此外,图3(b)所示结构中也发现了类似的现象.谱中1st BL在费米面以下 $-336$ 和 $-828$  mV能量处存在明显电导峰,而2nd BL则是在 $-141$ 和 $-662$  mV能量下存在.从图3中不难发现,BL之间和ML之间谱形相像,并且相邻薄膜的STS谱有一个近乎 $\pi$ 相位的位移(上下层有接近峰谷对峰顶的规律).

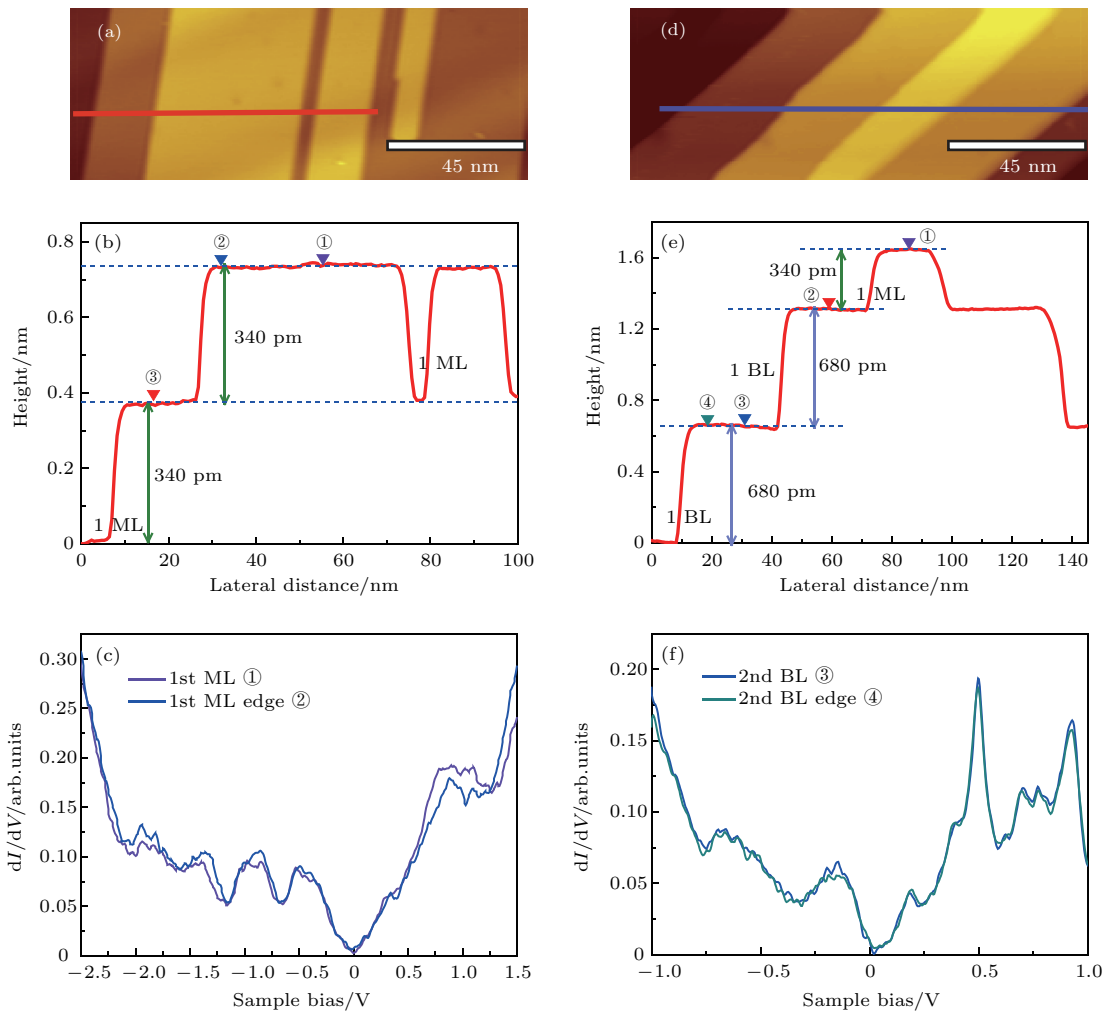


图2 Bi(110)相ML和BL的边缘态 (a) 具有两个ML的Bi(110)结构区域; (b) 为(a)图中红色线条处的高度示意图,分别在两个ML台面上以及最上层边缘处取点测量其局域态密度,分别以紫、蓝、红三色表示; (c) 最上层ML及其边缘的STS谱,测量范围为 $-2.5-1.5$  V,隧道电流为99 pA; (d) 具有1 ML和2 BL的结构区域; (e) 为图(d)中蓝色线条处的高度示意图,自上而下在三个不同层厚的表面取点测量其局域态密度,分别用紫色、红色、蓝色和墨绿色表示; (f) 第二个BL及其边缘的STS谱,测量范围是 $-1-1$  V,隧道电流为100 pA

Fig. 2. The edge state of Bi(110) phase above ML and BL: (a) One section with two ML Bi(110) structure; (b) the height schematic over the red line in (a), take points and measure the local density of states over 2 ML stage and 1st ML edge, marked with purple, blue and red respectively; (c) STS on 1st ML and 1st ML edge,  $V_S = -2.5-1.5$  V,  $I = 99$  pA; (d) one section with 1 ML and 2 BL Bi(110) structure; (e) the height schematic over the blue line in (d), take points and measure the local density of states at different layers from top to bottom signed in purple, red, blue and dark green respectively; (f) STS on 2nd BL and 2nd BL edge,  $V_S = -1-1$  V,  $I = 100$  pA.

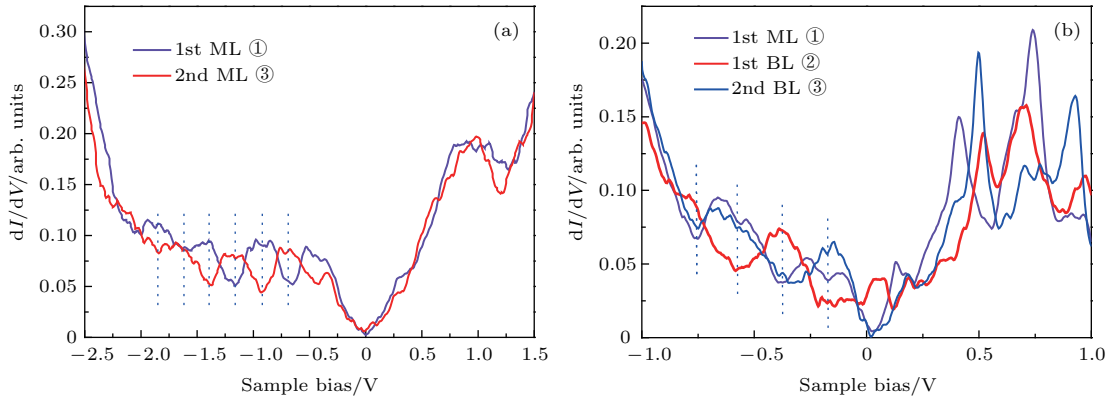


图3 Bi(110) 薄膜不同层厚的量子阱态 (a) 图 2(b) 中 2 ML 上的 STS 谱, 分别用紫色、红色表示, 测量范围是 2.5—1.5 V, 隧道电流为 99 pA; (b) 图 2 中的 1 ML 和 2BL 上的 STS 谱, 测量范围是 -1—1 V, 隧道电流为 100 pA, 分别用紫色、红色、蓝色表示

Fig. 3. Quantum well state over different layers of Bi(110) film: (a) STS over 2 ML structure in figure 2(b), show in purple and red respectively,  $V_S = -2.5-1.5$  V,  $I = 99$  pA; (b) STS over 1 ML and 2 BL structure in figure 2(e), show in purple, red and blue respectively,  $V_S = -1-1$  V,  $I = 100$  pA.

当材料的尺寸减小到电子的费米波长(德布罗意波长)尺度时, 薄膜内部电子受到表面和界面的限制, 在费米面附近的电子态会出现不同于体材料的量子化振荡, 即为量子尺寸效应(quantum size effect, QSE)<sup>[23,24]</sup>, 其特征是态密度会出现周期性的峰值. 由此推测, 图 3 中 STS 谱线特征来源于 Bi(110) 薄膜中的 QSE. 有意思的是, 本次实验结果与之前中国科学院物理所在 Si(111) 衬底上低

温生长的 Pb 薄膜实验结果具有相似性<sup>[25]</sup>. 外延的 Pb 薄膜在 21 个 ML 以下为双层结构模式生长, 在更高的覆盖度下则转变为单层生长. 理论分析认为, 这种独特的生长模式与 Pb 薄膜中 QSE 导致的结合能随厚度存在奇偶层数之间的周期振荡有关. 本实验观察到 Bi(110) 薄膜存在量子尺寸效应, 其产生机理以及对薄膜性质的影响还有待进一步的研究.

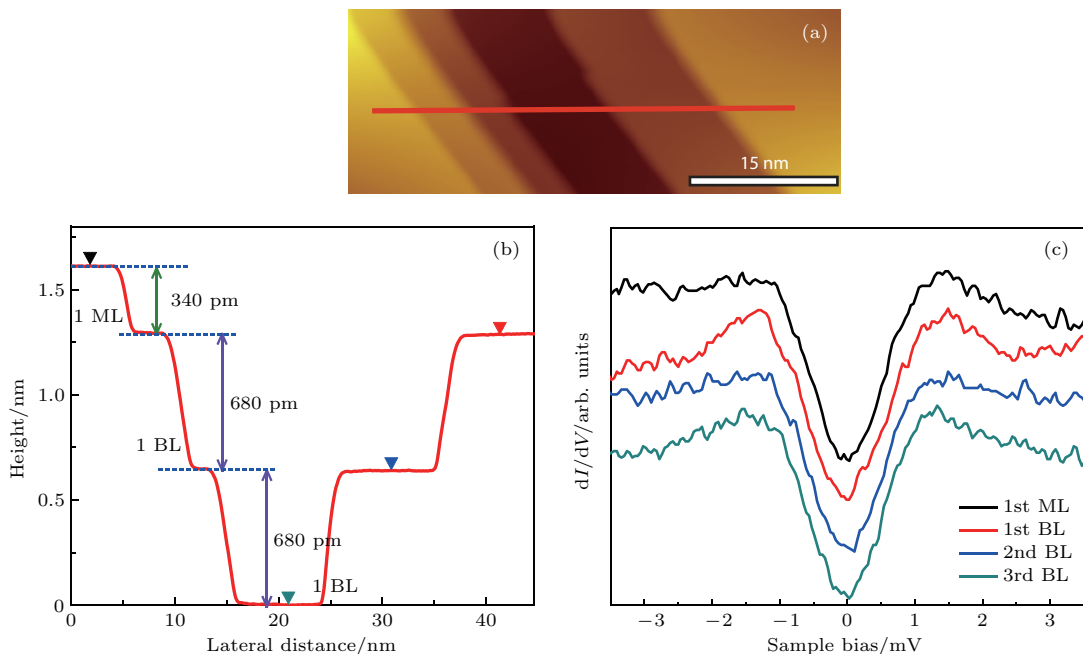


图4 Bi(110) 薄膜上诱导的超导态 (a) 具有 1 个 ML, 3 个 BL 结构的区域; (b) 为 (a) 图中红色线条处的高度示意图; (c) 自上而下, 依次在 (b) 中不同层厚度位置测 STS 谱, 分别以黑色、红色、蓝色和墨绿色表示, 范围为 -3.5—3.5 mV, 隧道电流为 101 pA

Fig. 4. The induced superconductivity of Bi(110) film: (a) One section with 1 ML and 3 BL structure; (b) the height schematic over the red line in (a); (c) STS spectra were measured at different layers in (b), from top to bottom signed in black, red, blue and dark green respectively.  $V_S = -3.5-3.5$  mV,  $I = 100$  pA.

在超导衬底上的外延拓扑绝缘体薄膜, 可以通过近邻效应在其表面实现自旋非简并的P型配对超导相, 并可能存在马约拉纳准粒子等独特性质. 因此, 本次实验对超导近邻效应的检测也至关重要.

在一块生长15 min的样品表面, 寻找到一处具有1个ML, 3个BL结构的区域(如图4(a)), 自上而下地在每个平台上依次取点, 分别以黑色(1st ML)、红色(1st BL)、蓝色(2nd BL)、墨绿色(3rd BL)标记(如图4(b)), 测量温度为液氦下4.2 K左右. 图4(c)自上而下依次显示不同厚度下的薄膜超导态. 从谱中可以观察到, 不同层的薄膜上均能观察到超导能隙. 通过s波超导的Bardeen-Cooper-Schrieffer理论公式拟合, 发现1st ML的能隙在0.47 meV左右, 1st BL, 2nd BL, 3rd BL的能隙分别为0.53, 0.502和0.502 meV. 这里1st BL的能隙稍大, 可能是由测量时环境的噪音等因素引起的误差导致. 而指数型衰减的初期变化得平稳缓慢, 使得整体测量结果在薄膜厚度较薄时并未出现明显衰减现象.

## 4 结 论

本实验利用分子束外延技术在室温低生长速率条件下制备出高质量的Bi(110)薄膜, 并结合扫描隧道显微镜对样品的形貌和电子特性做了研究. 薄膜由于表面能的振荡变化, 在约4 BL之下呈现双层生长模式, 之后继而转变为单层模式. 实验中观测到了样品表面由NbSe<sub>2</sub>衬底近邻效应导致的超导现象(约0.5 meV), 但并未发现Bi(110)薄膜上边缘态的存在, 其拓扑相的存在与否还有待进一步的验证. 在薄膜上观测到了周期性量子阱态特征, 这与生长在Si衬底上的Pb薄膜性质具有一定的相似性; 然而其特殊量子阱态形成的原因及其对样品薄膜性质的影响还有待去发现.

## 参考文献

[1] König M, Wiedmann S, Brüne C, Roth A, Buhmann H, Molenkamp L W, Qi X L, Zhang S C 2007 *Science* **318**

766  
 [2] Bernevig B A, Hughes T L, Zhang S C 2006 *Science* **314** 1757  
 [3] Kane C L, Mele E J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 146802  
 [4] Moore J E 2010 *Nature* **464** 194  
 [5] Qi X L, Zhang S C 2010 *Phys. Today* **63** 33  
 [6] Qi X L, Hughes T L, Zhang S C 2008 *Phys. Rev. B* **78** 195424  
 [7] Chang C Z, Zhang J S, Feng X, Shen J, Zhang Z C, Guo M H, Li K, Ou Y B, Wei P, Wang L L, Ji Z Q, Feng Y, Ji S H, Chen X, Jia J F, Dai X, Fang Z, Zhang S C, He K, Wang Y Y, Lu L, Ma X C, Xue Q K 2013 *Science* **340** 167  
 [8] Deutscher G 1971 *Solid State Commun.* **9** 891  
 [9] Majorana E 1937 *II Nuovo Cimento* **14** 171  
 [10] Fu L, Kane C L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 096407  
 [11] Murakami S 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 236805  
 [12] Liu Z, Liu C X, Wu Y S, Duan W H, Liu Feng, Wu J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 136805  
 [13] Xiao S H, Wei D H, Jin X F 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 166805  
 [14] Hirahara T, Bihlmayer G, Sakamoto Y, Yamada M, Miyazaki H, Kimura S, Blügel S, Hasegawa S 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 166801  
 [15] Yang F, Miao L, Wang Z F, Yao M Y, Zhu F F, Song Y R, Wang M X, Xu J P, Fedorov A V, Sun Z, Zhang G B, Liu C H, Liu F, Qian D, Gao C L, Jia J F 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 016801  
 [16] Sun H H, Wang M X, Zhu F F, Wang G Y, Ma H Y, Xu Z A, Liao Q, Lu Y H, Gao C L, Li Y Y, Liu C H, Qian D, Guan D D, Jia J F 2017 *Nano Lett.* **17** 3035  
 [17] Wada M, Murakami S, Freimuth F, Bihlmayer G 2011 *Phys. Rev. B* **83** 121310  
 [18] Lu Y H, Xu W H, Zeng M G, Yao G G, Shen L, Yao M, Luo Z Y, Pan F, Wu K 2015 *Nano Lett.* **15** 80  
 [19] Nagao T, Sadowski J T, Saito M, Yaginuma S, Fujikawa Y, Kogure T, Ohno T, Hasegawa Y, Hasegawa S, Sakurai T 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 105501  
 [20] Bian G, Wang X, Miller T, Chiang T C, Kowalczyk P J, Mahapatra O, Brown S A 2014 *Phys. Rev. B* **90** 195409  
 [21] Yaginuma S, Nagao T, Sadowski J T, Saito M, Nagaoka K, Fujikawa Y, Sakurai T, Nakayama T 2007 *Surf. Sci.* **601** 3593  
 [22] Hatta S, Ohtsubo Y, Miyamoto S, Okuyama H, Aruga T 2009 *Appl. Surf. Sci.* **256** 1252  
 [23] Chiang T C 2000 *Surf. Sci. Rep.* **39** 181  
 [24] Paggel J J, Miller T, Chiang T C 1999 *Science* **283** 1709  
 [25] Zhang Y F, Jia J F, Han T Z, Tang Z, Shen Q T, Guo Y, Qiu Z Q, Xue Q K 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 096802

# Scanning tunneling microscopy research of Bi(110) thin films grown on NbSe<sub>2</sub>\*

Liu Jian-Yu<sup>1)</sup> Sun Hao-Hua<sup>1)</sup> Guan Dan-Dan<sup>1)2)</sup> Li Yao-Yi<sup>1)2)</sup> Wang Shi-Yong<sup>1)2)</sup>  
Liu Can-Hua<sup>1)2)</sup> Zheng Hao<sup>1)2)</sup> Jia Jin-Feng<sup>1)2)</sup>†

1) (*Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control, Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

2) (*Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing 210093, China*)

( Received 18 May 2018; revised manuscript received 31 May 2018 )

## Abstract

Due to the novel physical properties induced by the strong spin orbit coupling and band inversions in the energy band structure, two-dimensional topological insulator has become a hot research point in the field of condensed matter physics and material science in recent years. Particularly, two-dimensional topological insulator may host exotic Majorana fermionic excitations in its edge state if superconductivity is introduced. Bi thin film with (111) orientation proves to be a two-dimensional topological insulator both in theory and in experiment. However, the topological nature of Bi thin film with (110) orientation has not yet been confirmed. In this study, high quality Bi(110) thin films are successfully prepared on superconductor NbSe<sub>2</sub> surfaces, by the molecular beam epitaxial technology at ambient temperature and a low deposition rate ( $\sim 24$  °C,  $\sim 3$  min/bilayer). The morphologies and electronic properties of the samples are studied by using scanning tunneling microscopy and spectroscopy. The experimental results reveal that the growth mode changes from bilayer (BL) in BL mode to monolayer (ML) in ML mode. Such transition takes place at a critical height of about 4 BLs. The mechanism of the growth mode transition is believed to be induced by the drastic variation of the surface energies of the thin films with different thickness values. Due to the large coverage of Bi(110) film on the NbSe<sub>2</sub> substrate, it is almost impossible to find the exposed areas of NbSe<sub>2</sub> substrate surface in practice. Especially on the sample with a large number of layers of Bi thin film, it is hard to directly determine the number of layers for each film. Hence, the critical thickness could be only estimated by controlling the deposition time and growth rate combining with the measurements of stage height of the film. The nearly identical local density of states wherever measured in the interior of a terrace or at the step edges can be discerned from the  $dI/dV$  spectra, which is thus hard to corroborate with non-trivial topology in either BL or ML thick Bi(110) film. The superconductivity induced by proximity effect from the superconducting substrate NbSe<sub>2</sub> is also observed on the thin films. Through Bardeen-Cooper-Schrieffer type data fitting, the superconducting gap on the Bi thin film is estimated at about 0.5 meV. In addition, the quantum well state, which is often observed in thin films, is also revealed from the Bi(110) thin films, whose characteristic is equal energy spacing between peaks in  $dI/dV$  spectra. Noticeably, the spectral shapes of BL and ML are similar, and the local density of states from adjacent film layers displays an approximate  $\pi$  phase shift.

**Keywords:** Bi film, topological insulator, proximity effect, quantum well state

**PACS:** 07.79.Cz, 68.37.-d, 68.55.-a, 68.65.Fg

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180977

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2016YFA0301003, 2016YFA0300403), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11521404, 11634009, U1632102, 11504230, 11674222, 11574202, 11674226, 11574201, U1632272, 11655002), and the Shanghai Committee of Science and Technology, China (Grant No. 16DZ2260200).

† Corresponding author. E-mail: [jfjia@sjtu.edu.cn](mailto:jfjia@sjtu.edu.cn)