

# Sr/Si 界面沉积 SrTiO<sub>3</sub> 初始生长阶段的扫描隧道显微术研究\*

邱云飞 杜文汉 王 兵<sup>†</sup>

(中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室, 合肥 230026)

(2010年5月14日收到; 2010年6月30日收到修改稿)

本文工作利用脉冲激光沉积术(PLD)和超高真空扫描隧道显微术(UHV-STM),研究了在 Sr/Si(001)-(2×1)衬底表面上真空室温沉积几个单层 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜的初始生长过程. 经660 °C退火处理后, Sr/Si 衬底表面上形成了纳米岛状结构. 经分析, 这些纳米小岛为 C49-TiSi<sub>2</sub> 和 C54-TiSi<sub>2</sub>. 实验结果表明, 在没有氧气的情况下退火, Sr/Si 界面无法有效阻止 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜与 Si 衬底之间的相互作用.

**关键词:** 脉冲激光沉积术(PLD), 扫描隧道显微镜(STM), SrTiO<sub>3</sub>, C54-TiSi<sub>2</sub>

**PACS:** 68.37.Ef, 81.16.-c, 61.46.Df

## 1. 引言

随着半导体器件微型化的发展, 使用传统 SiO<sub>2</sub> ( $k \approx 3.9$ ) 材料制备的栅氧化层在厚度达到纳米量级后, 由于量子隧穿效应, 将无法继续保持绝缘性能, 致使器件失效. 而 SrTiO<sub>3</sub> (STO) 材料具有很高的介电常数, 有望取代 SiO<sub>2</sub> 成为下一代栅氧化物材料, 因此硅基 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜生长引起广泛关注与研究<sup>[1-19]</sup>. 其中, SrTiO<sub>3</sub> 薄膜生长初始阶段的研究对界面结构的理解以及之后对界面生长的控制都起着至关重要的作用.

McKee 等人<sup>[2,8]</sup> 的研究表明: 在外延生长的 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜与 Si 衬底之间需要形成 Sr/Si 亚单层界面结构, 它作为晶面相, 可以防止界面生成氧化物. 这一研究成果推动了硅基 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜的发展. 迄今为止, 国内外的研究小组已成功制得较高质量的 SrTiO<sub>3</sub> 晶体薄膜<sup>[4-6,9,10,13-16]</sup>, 但薄膜厚度没有达到原子层量级, 而且薄膜与衬底之间的界面或多或少都存在着无序氧化层. 产生无序氧化层的主要原因就是在实验中, 由于高的氧分压环境, O 原子会与 Si 等原子发生反应形成氧化层<sup>[6,17]</sup>, 即使有 Sr/Si 界面的存在, 也无法避免. 另外在高温的条件下, 尤其当

O 原子不足时, 衬底中的 Si 原子和 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜中的 Ti 原子容易相互迁移进而发生反应, 最终导致 TiSi<sub>2</sub> 的产生<sup>[14]</sup>.

在 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜生长初期可能出现的 TiSi<sub>2</sub> 是一种低电阻率、热稳定性好的化合物<sup>[20]</sup>. TiSi<sub>2</sub> 拥有两种构型: C49 型和 C54 型. C49-TiSi<sub>2</sub> 为底心正交结构, 电阻率约 60—90  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ; 而 C54-TiSi<sub>2</sub> 为面心正交结构, 电阻率为 12—20  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ <sup>[21]</sup>. 相对于 C54-TiSi<sub>2</sub>, C49-TiSi<sub>2</sub> 的热稳定性较差, 会在高温下 (650 °C 左右) 转化为 C54 构型<sup>[22,23]</sup>. 国内外的研究小组在 Si 衬底上已经能够成功制备 TiSi<sub>2</sub> 纳米岛<sup>[24-31]</sup>, 但对 TiSi<sub>2</sub> 岛表面的研究相对较少.

本文工作的主要目的是研究在 Sr/Si 表面上 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜的初始生长情况. 薄膜制备方法为脉冲激光沉积术 (PLD)<sup>[32]</sup>. 实验主要内容是在 Sr/Si (001) 表面上利用 PLD 真空室温沉积 1nm 左右的 SrTiO<sub>3</sub> 非晶薄膜, 再进行高温退火, 最后利用 STM 研究样品表面结构. 为了防止在富氧环境中形成无序氧化层, 实验在超高真空中进行, 退火过程中没有通入氧气. 经过样品制备和 STM 研究, 我们在 Sr/Si 界面上观察到纳米岛状结构, 并获得了岛平台表面的高分辨 STM 形貌相、dI/dV 图像以及电子谱学数据. 经分析, 纳米岛为 TiSi<sub>2</sub>.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60771006)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: bwang@ustc.edu.cn

## 2. 实验细节

本文实验是在超高真空环境中进行,本底真空度在  $1.0 \times 10^{-8}$  Pa 左右. 主要实验仪器是扫描隧道显微镜 (STM, MATRIX, Omicron GmbH) 和 Nd:YAG 脉冲激光器 (Quanta-Ray Pro 250). 实验选用的衬底是 p 型 Si (001) 硅片 (硼掺杂, Virginia Semiconductor), 电阻率为  $1-20 \Omega \cdot \text{cm}$ , 硅片尺寸为  $10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ . 洁净 Si(001) 重构表面的获得方法为: 在超高真空系统中, 硅片在  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度下去气 12 h 以上, 然后 10 s 内加热至  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  再快速降到  $700 \text{ }^\circ\text{C}$ , 待气压恢复, 重复几次, 直到气压变化平缓, 最后降到  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , 持续 5 min 左右, 再缓慢降至室温, 这样就能获得干净、低缺陷的 Si(001)-(2×1) 表面.

接着我们把已经重构好的硅片传送到制样腔 (真空度为  $1.0 \times 10^{-8}$  Pa), 在室温下采用 PLD 技术将 SrO (99.9%, Aldrich) 沉积到 Si(001) 表面, 厚度约为 0.5 nm, 采用的激光波长为 355 nm, 输出功率为 300 mW, 脉冲频率为 10 Hz, 脉冲宽度为 8 ns, 典型沉积时间为 60 s. 然后将样品进行退火处理, 退火温度为  $550 \text{ }^\circ\text{C}$ , 退火时间为 30 min, 这样就能获得 Sr/Si(001)-(2×1) 重构表面. Sr/Si(001) 重构界面的获得可以通过 STM 研究来确认. 待确认 Sr/Si 重构界面之后, 将样品传送到制样腔, 用同样的方法室温沉积约 1 nm 厚的 SrTiO<sub>3</sub> 非晶薄膜, 再在  $660 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度下退火 1 h, 然后传送到扫描腔进行 STM 研究.

实验使用的针尖是利用电化学刻蚀方法获得的 W 针尖 (Goodfellow), 直径 0.25 mm. 针尖在真空中首先使用场发射方法进行处理, 后在 Si(111) 上修饰, 使针尖状态适合 STM 扫描. 所有的 STM 图像和 STS 谱学测量均是在室温下采集的.

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 实验结果

图 1(a) 是沉积 SrTiO<sub>3</sub> 之前 Sr/Si 衬底表面的 STM 图像. Sr/Si 界面的产生是为了防止 Si 衬底表面在实验过程中重新氧化<sup>[8]</sup>. 实验结果表明: 如果退火温度在  $500-600 \text{ }^\circ\text{C}$ , 衬底表面可以形成大面积

的 Sr/Si(001)-(2×1) 的重构界面, 如果退火温度升高, 界面趋向于形成 (2×3) 重构. 图 1(a) 描述的是在  $575 \text{ }^\circ\text{C}$  下退火 30 min 后得到的大面积 Sr/Si(001)-(2×1) 重构表面形貌图像. 沉积 1 nm 左右的 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜后, 未退火直接进行 STM 扫描, 衬底表面呈无序状态 (如图 1(b) 所示). 实验中我们一步步提高退火温度进行研究, 发现直到退火温度达到  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , 表面才开始重构形成纳米小岛.

图 1(c) 是样品在  $660 \text{ }^\circ\text{C}$  下退火 60 min 后得到的样品表面 STM 形貌图. 从图中可以看出, 表面上形成了纳米岛状结构, 而这些纳米岛大体可以分成两种类型: 尖顶岛和平顶岛, 经统计, 平顶岛约占 44% (图 1(d)). 如图 1(e) 和 (f) 所示的就是尖顶岛 (A) 和平顶岛 (B) 的 STM 形貌图以及它们的轮廓线. 这两种岛的高度一般在 2 nm 以下, 横向尺寸只有 15 nm 左右. 如果继续沉积 SrTiO<sub>3</sub> 并退火处理, 其横向尺度并没有明显的变化. 从形貌尺寸来看, 两种类型的纳米岛可能是同一种物质, 但是在生长过程中, 它们可能沿着不同的晶向生长, 从而形成了不同的结构.

从图 1(e) 中可以看出, 纳米岛生长在 Sr/Si(001)-(2×3) 界面上, 而非原先的 (2×1) 界面, 这是因为在退火过程中, 温度超过  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , 原先的 (2×1) 界面进一步重构形成了 (2×3) 重构<sup>[33]</sup>. 纳米岛的生长位置一般是在台阶边缘, 有的就生长在台阶上.

缩小扫描范围后, 实验发现了平顶岛平台表面有序的结构图像, 如图 2 所示. 对平顶岛的平台结构, 实验观察到两种不同的 STM 结构形貌图像. 如图 2(a) 所示, 横向尺寸为 10 nm 左右的平顶纳米岛生长在 Sr/Si(001)-(2×3) 界面上, 从图 2(b) 中给出的平台细节图像中可以清楚地观察到平台的周期结构: 在 *a*, *b* 两条正交直线方向上呈现周期排布, 周期间距分别为 0.72 nm 和 1.35 nm; 另一种形貌图像如图 2(c), (d) 所示, 岛的横向尺寸为 15 nm 左右, 平台表面的 STM 形貌相为呈六次对称结构分布的圆形亮斑, 相邻亮斑之间的距离约为 0.85 nm.

进一步的实验研究表明: 图 2(d) 这种六次对称周期结构存在着成像偏压依赖的现象. 如图 3 所示, (a), (b), (c), (d) 四幅图是原位扫描获得的表面占据态 STM 形貌相. 随偏压减小, 可以很清楚地看到表面形貌相的变化. 在扫描区域内有一个缺陷位置 (图中黑色箭头所指位置), 可以作为参照位置,

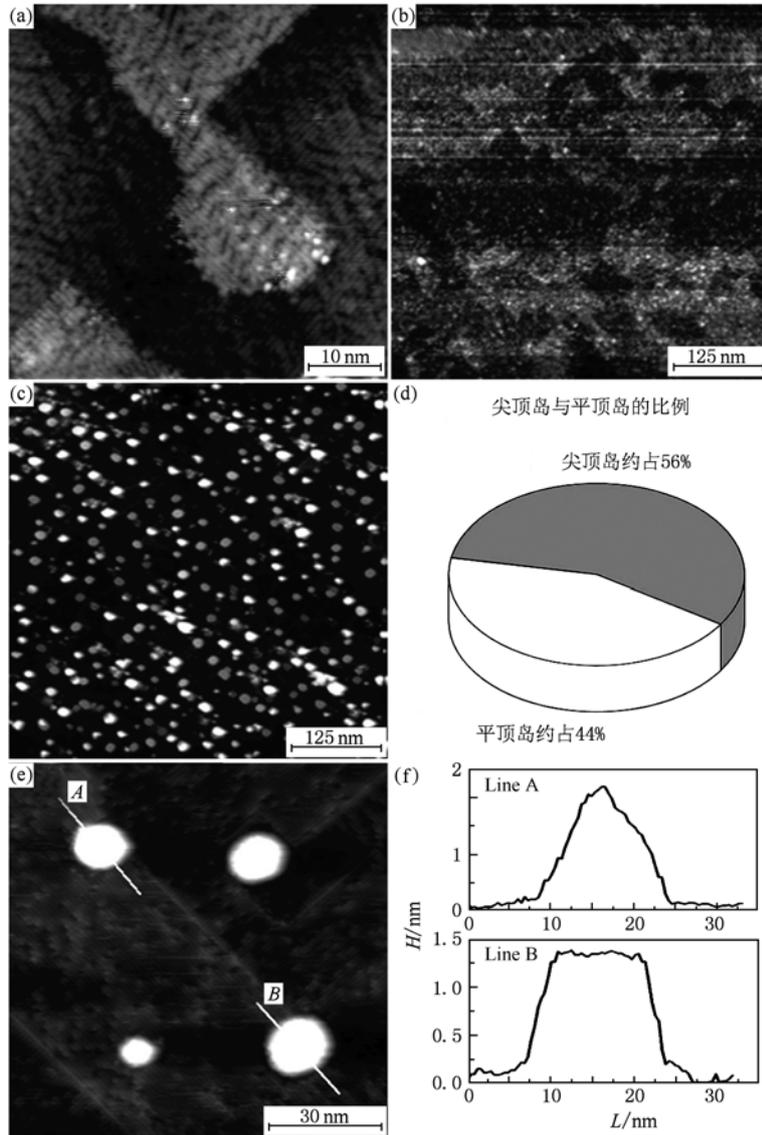


图1 (a) 沉积 SrTiO<sub>3</sub> 之前衬底 Sr/Si(001)-(2×1) 重构表面的 STM 形貌相 (-1.6 V, 50 pA, 50 nm × 50 nm); (b) 沉积 SrTiO<sub>3</sub> 之后未退火表面 STM 形貌相 (+2 V, 50 pA, 500 nm × 500 nm); (c) 样品退火后表面的 STM 形貌图 (+2 V, 20 pA, 500 nm × 500 nm); (d) 图(c) 中平顶岛与尖顶岛的比例; (e), (f) 两种纳米岛的 STM 形貌相及轮廓线

在图 3(a) 中每三个相邻亮斑中间区域的差别不太明显, 随着所加偏压的减小, 白色箭头所指的这一类区域与其他地方有明显不同: 呈现孔洞状, 且周期分布, 这就表明此类区域与其他地方的电子结构不同. 图 3(d) 中所示的边长为 1.45 nm 的菱形表示周期结构单胞.

六次对称结构平顶岛的非占据态图像也表现出偏压依赖关系. 图 4(a), (b) 给出了六次对称结构平顶岛平台表面同一区域不同偏压下的非占据态图像, 图 4(c), (d) 分别是同时采集的与图 4(a),

(b) 相对应的 dI/dV 图像. 图 4(a) 为平台表面在偏压为 +2.1 V 下的形貌相. 可以看到, 表面呈现出与负偏压完全不同的结构, 亮斑呈现出三角形, 周期排列, 而对应于 +2.1 V 偏压下的 dI/dV 图像出现蜂窝状六角图像, 如图 4(c) 所示. 当偏压降低至 +0.7 V 时, 平台表面形貌相变为类似于蜂窝状六角图像, 如图 4(b) 所示, 其对应的 dI/dV 图像从 +2.1 V 的蜂窝状到三聚体状再到圆形亮斑的密排, 如图 4(d) 所示. 与同一区域的负偏压形貌相(图 4(e)) 作比较, 可以给出与图 3(d) 相对应的单胞. 可以看

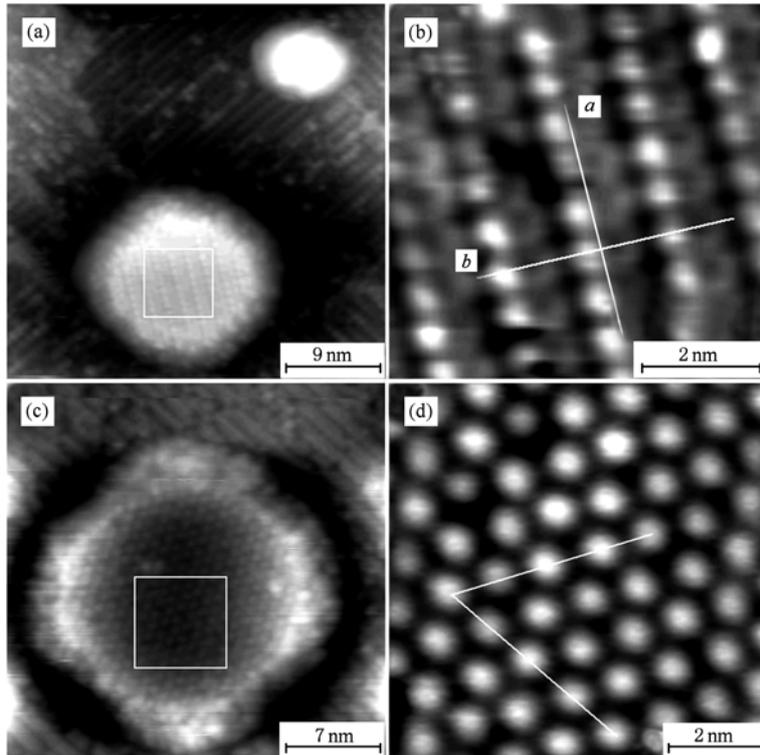


图2 平顶纳米岛平台表面的两种 STM 形貌相 (a) 具有正交周期结构的平台表面 STM 形貌图(+2.0 V, 50 pA, 31.1 nm × 31.1 nm); (b) 平台表面正交周期结构的高分辨 STM 形貌图(6.3 nm × 6.3 nm); (c) 具有六次对称结构的平台表面 STM 形貌图(-1.7 V, 50 pA, 27.8 nm × 27.8 nm); (d) 六次对称结构表面的高分辨 STM 形貌图(-2.0 V, 50 pA, 6.7 nm × 6.7 nm)

到,单胞顶角的暗点在较高的正偏压下(+2.1 V)呈明亮的三角形.图4(f)是负偏压下表面形貌相的两个不同位置处(图4(e)中A,B位置)的 $I/V$ 谱和 $dI/dV$ 谱.在 $dI/dV$ 曲线中,可以看出在占据态范围内,表面上两种典型位置处的态密度分布情况基本一致,都在-1.3 V处存在电子态,只是在态密度大小上有一定差异,故此在STM图像上表现出亮暗差异.非占据态下这两者的态密度差异很明显,B位在+0.6 V处有一峰的存在,而A位没有,这就解释了在不同正偏压下STM图像中B位亮暗变化的现象.

### 3.2. 分析和讨论

实验中纳米岛是在Sr/Si界面上真空室温沉积SrTiO<sub>3</sub>非晶薄膜然后在660 °C下退火形成的.根据Goncharova等人<sup>[34]</sup>的研究表明:Si(001)上外延生长SrTiO<sub>3</sub>薄膜(2—100 nm),在真空条件下,475—750 °C温度下退火,Ti原子会与衬底中的Si原子反应生成TiSi<sub>x</sub>.因此实验得到的纳米岛可能是TiSi<sub>2</sub>,也可能是SrTiO<sub>3</sub>.虽然STM缺乏化学元素的直接分辨,但对平顶纳米岛,可根据其周期结构和电子态

性质进行分析,推断其结构类型.

对于图2(b)所示的具有正交周期结构的表面构型,其晶格周期与SrTiO<sub>3</sub>和C54-TiSi<sub>2</sub>的晶格常数均不相符,而与C49-TiSi<sub>2</sub>的构型较为符合.C49-TiSi<sub>2</sub>属于正交晶系,三个方向上的晶格常数分别为 $a = 0.360$  nm,  $b = 1.38$  nm,  $c = 0.362$  nm<sup>[26]</sup>.可以看出,图2(b)中 $b$ 方向上的间距与C49-TiSi<sub>2</sub>晶格[010]方向的晶格常数非常接近,而图2(b)中 $a$ 方向上的间距近似是C49-TiSi<sub>2</sub>晶格[100]或[001]方向晶格常数的2倍.所以从周期结构上看,图2(b)中的这种结构很可能就是C49-TiSi<sub>2</sub>(100)面或(001)面(2 × 1)重构构型.

对于具有六次对称结构的平顶纳米岛,我们在实验中对其进行了更为细致的研究与分析,认为这种表面结构为C54-TiSi<sub>2</sub>(001)-(3 × 3)重构,有以下几个依据:

1) 从周期结构类型与间距上看,C54-TiSi<sub>2</sub>(001)-(3 × 3)重构较符合实验图像中的周期结构,而SrTiO<sub>3</sub>没有发现符合的结构;

2) 从晶格匹配上看,C54-TiSi<sub>2</sub>(001)面与衬底

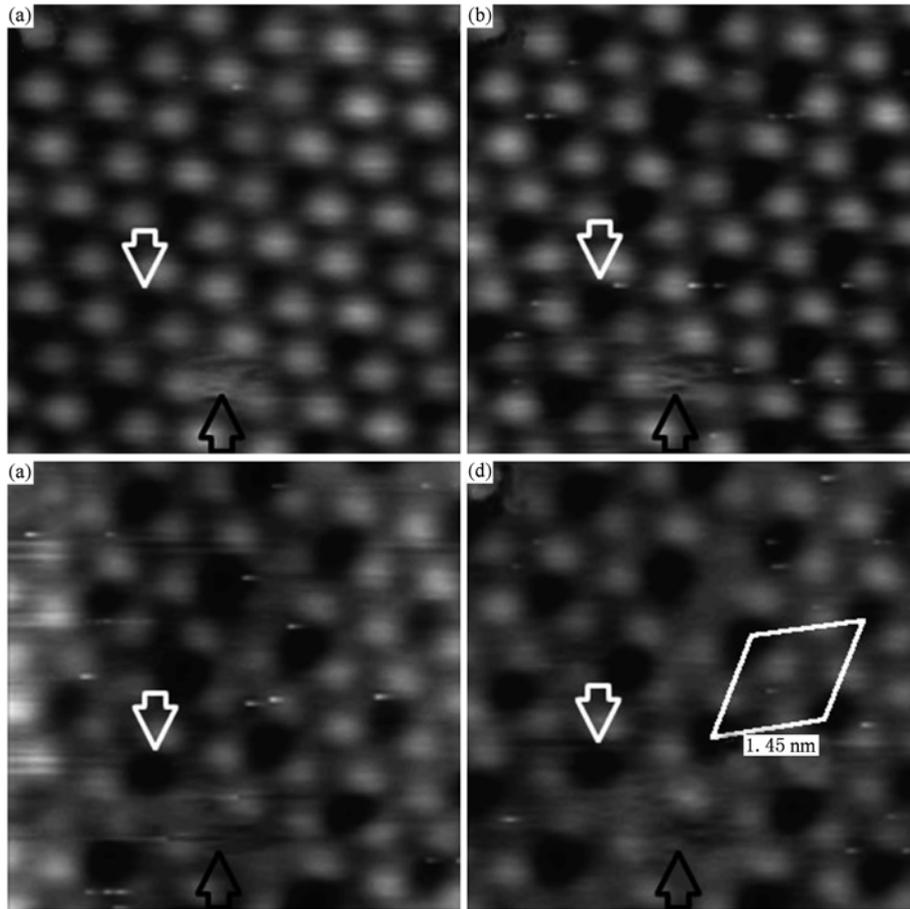


图3 原位扫描获得的六次对称结构表面不同偏压下的占据态 STM 形貌相(6.2 nm×6.2nm)  
(a) -2.0 V, 50 pA; (b) -1.8 V, 50 pA; (c) -1.6 V, 50 pA; (d) -1.4 V, 20 pA

的晶格失配度在 7% 左右<sup>[29]</sup>, 更容易形成岛状结构, 而 SrTiO<sub>3</sub> 与衬底能够很好的匹配(失配度 <2%), 更容易形成薄膜形态;

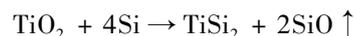
3) 根据 Gutowski 等人的理论计算<sup>[12]</sup>, 在 Si 衬底上外延生长的 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜, 其费米面以上 0—1 eV 是没有电子态的, 而从实验中得到的 dI/dV 谱上看, 这一区域明显有电子态.

图 5(a) 展示的是 C54-TiSi<sub>2</sub> 的晶胞结构, 属于四方晶系, 晶格常数分别为  $a = 0.826 \text{ nm}$ ,  $b = 0.480 \text{ nm}$ ,  $c = 0.855 \text{ nm}$ . 晶胞结构可以分成四层(如图中的 A, B, C, D 四个平面), 每一层的结构其实都是一样的, 只是层与层之间有错位. 对于(001)面, 其基本结构为正六边形, 中心为 Ti 原子, 六个顶角分别有一个 Si 原子, 也即图 5(b) 中左边的小六边形(Si 原子未画出)所示. 图 5(b) 右边是根据实验图像画出的示意图, 可以把它和左边 C54-TiSi<sub>2</sub>(001)面的结构进行比较, 结构大小非常相似. 我们直接把模型与实验正负偏压形貌相重叠在一起, 进行直接比

照, 如图 5(c), (d) 所示, 可以发现模型尺寸与实验结果符合得很好.

C54-TiSi<sub>2</sub>(001) 表面发生弛豫, 导致原本等价的位置可能表现出不同的电子性质. 根据实验图像, C54-TiSi<sub>2</sub>(001) 表面可能出现三聚化现象. 至于重构形成机理以及重构表面的具体原子构型等, 需要更多理论计算的支持.

实验中 TiSi<sub>2</sub> 岛的形成, 主要是因为是在 Sr/Si 界面的缺陷和台阶处的 Si 原子在退火过程中发生迁移, 与 TiO<sub>2</sub> 发生反应. O 原子与 Si 原子反应生成 SiO 并升华, Ti 原子与 Si 原子反应生成 TiSi<sub>2</sub><sup>[29,35]</sup>.



在前人的实验中, 大多都在沉积 SrTiO<sub>3</sub> 的过程中通入氧气, 在高的氧分压下制备 SrTiO<sub>3</sub> 晶体薄膜. 然而正是在这种环境下, O 原子很容易与 Si 原子发生反应, 从而在界面处形成无序的氧化层. 为了防止氧化层的出现, 本次实验并没有氧气的参与, 不过正是 O 原子的缺失, 最终导致 Si 原子与 Ti

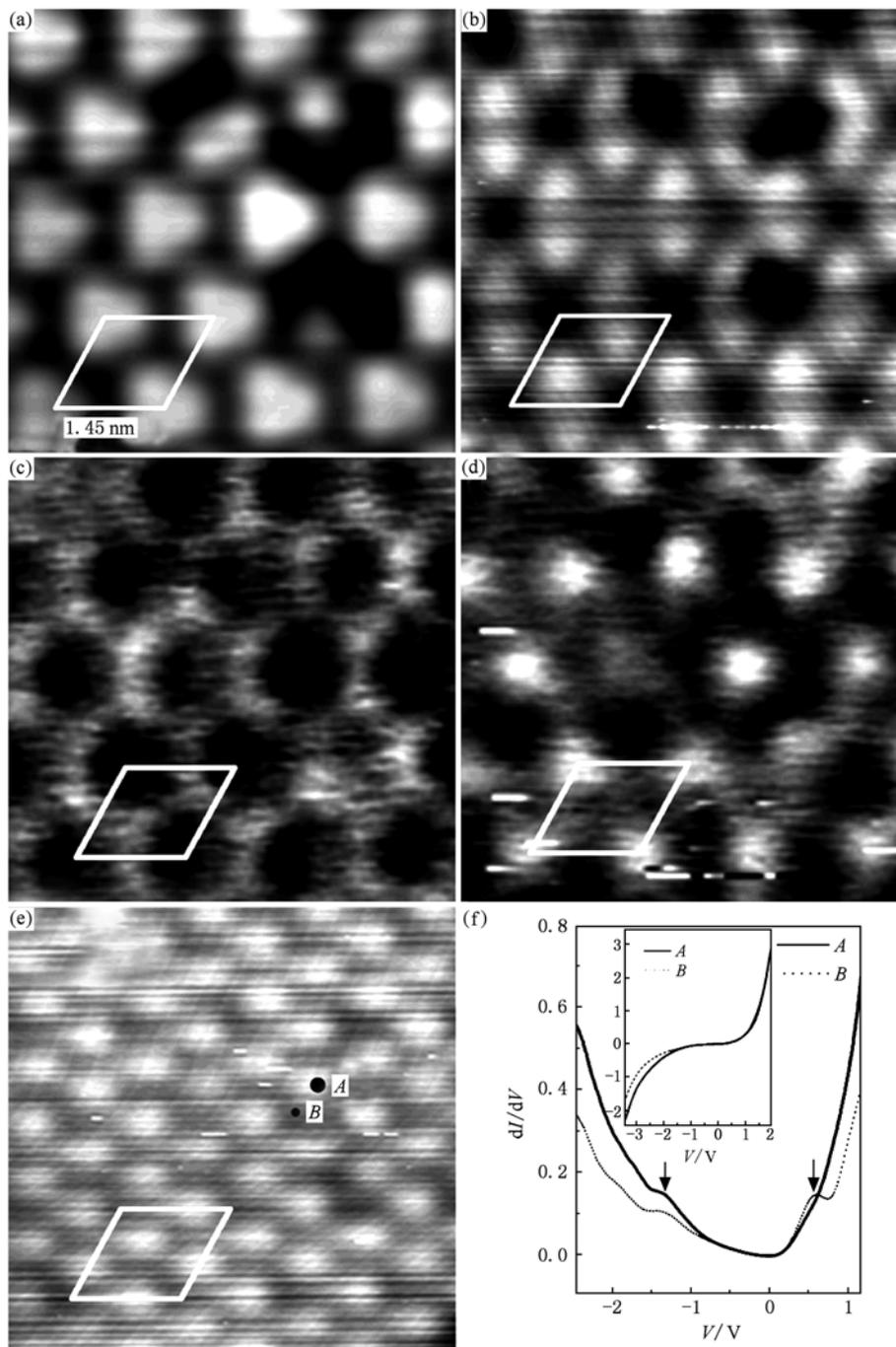


图4 (a)平台表面的非占据态 STM 形貌相(+2.1 V,80 pA,7.45 nm×7.45 nm);(b)表面非占据态 STM 形貌相(+0.7 V,80 pA);(c)图(a)对应的 dI/dV 图像;(d)图(b)对应的 dI/dV 图像;(e)表面占据态 STM 形貌相(-1.5 V,80 pA);(f)图(e)中 A,B 两个位置对应的 dI/dV 谱(内置图为其 I/V 特性曲线)

原子发生反应,形成  $\text{TiSi}_2$  纳米岛. 所以在  $\text{SrTiO}_3$  薄膜生长的初始阶段,一定的氧分压是必要的,但如何防止 Si 原子与  $\text{SrTiO}_3$  薄膜反应,还需要更多的研究.

实验中出现 C49-和 C54-两种构型的  $\text{TiSi}_2$  纳米岛,是由于退火时衬底局部温度不同造成的. 实验

采用直流加热方式,退火时硅片中间温度最高(660 °C 左右),两边的温度逐渐降低. 而 C49- $\text{TiSi}_2$  在650 °C 左右开始转化为 C54 构型,所以在实验中,样品表面不同区域就可能形成不同构型的  $\text{TiSi}_2$  纳米岛.

实验中形成的尖顶岛很可能也是  $\text{TiSi}_2$  结构. 根

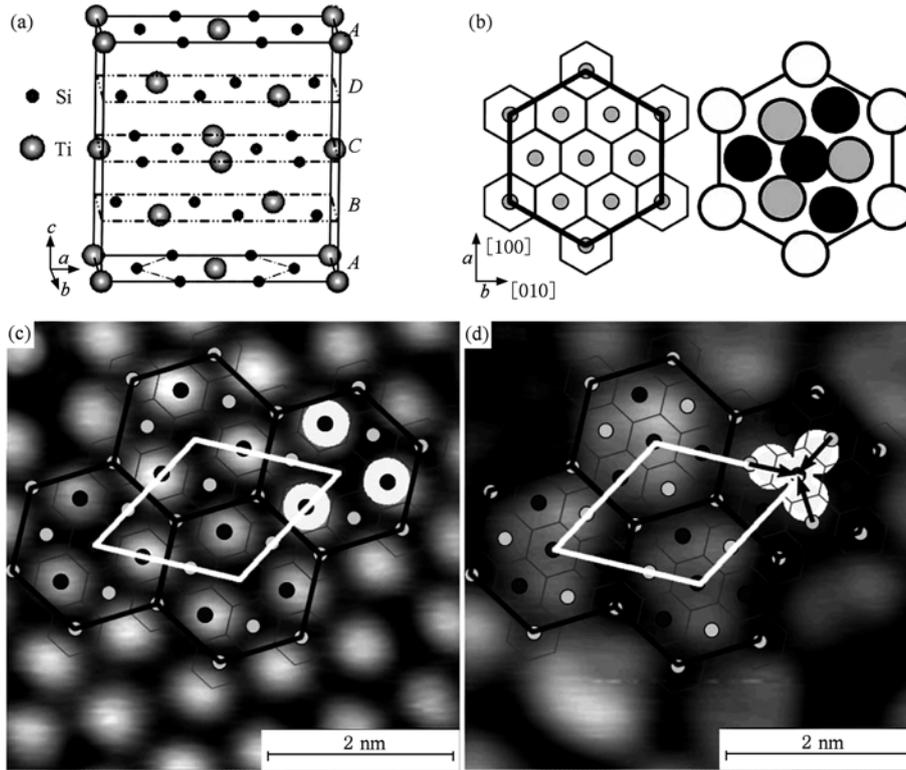


图5 C54-TiSi<sub>2</sub> (001)-(3×3)重构模型 (a) C54-TiSi<sub>2</sub> 晶胞结构; (b) 左为 C54-TiSi<sub>2</sub> (001) 面结构示意图, 右边是根据实验图像画出的结构示意图; (c) 占据态形貌相与模型的对照(-2.0 V, 50 pA); (d) 非占据态形貌相与模型的对照(+2.0 V, 50 pA)

据图 1(c) 中平顶岛的研究发现, 该区域生长的纳米岛为 C54-TiSi<sub>2</sub> 结构. 对于 C54-TiSi<sub>2</sub> 纳米岛, 理论计算结果表明(311)面是表面能最低的面<sup>[21]</sup>, XRD 研究同样发现(311)衍射峰强度最大<sup>[29]</sup>, 而图 1(c) 所示的区域内, 尖顶岛比例超过 50%, 这就说明了这些尖顶岛很可能就是 C54-TiSi<sub>2</sub> (311) 结构, 它们在生长过程中可能由于很大的晶格失配度(8% 左右), 没有形成平台结构, 而形成了尖顶结构.

#### 4. 结 论

本实验利用脉冲激光沉积术 (PLD) 在 Sr/Si

(001) 界面上真空室温沉积 1 nm 左右的 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜, 退火处理后利用扫描隧道显微术 (STM) 进行研究. 实验发现, 在衬底表面上生长出许多纳米岛, 这些纳米岛表现为平台结构和尖顶结构. 平台结构的纳米岛为 C49-TiSi<sub>2</sub> 或 C54-TiSi<sub>2</sub> (001)-(3×3) 岛, 分别表现为正交结构和六次对称结构. 实验没有得到 SrTiO<sub>3</sub> 晶体薄膜, 主要是因为实验中 O 原子的缺失和衬底中 Si 原子与 Ti 原子相互迁移并发生反应. 结果表明, 经 Sr 覆盖的 Si 衬底不足以阻止 SrTiO<sub>3</sub> 薄膜与 Si 反应生成 TiSi<sub>2</sub> 岛. 如何有效阻止衬底 Si 原子与薄膜的反应从而制备超薄 SrTiO<sub>3</sub> 晶体薄膜, 还有待进一步的研究.

[1] Nakagawara O, Kobayashi M, Yoshino Y, Katayama Y, Tabata H, Kawai T 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 7226  
 [2] McKee R A, Walker F J, Chisholm M F 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 3014  
 [3] Tambo T, Maeda K, Shimizu A, Tatsuyama C 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 3213

[4] Yu Z, Ramdani J, Curlless J A, Finder J M, Overgaard C D, Droopad R, Eisenbeiser K W, Hallmark J A, Ooms W J, Conner J R, Kaushik V S 2000 *J. Vac. Sci. Technol. B* **18** 1653  
 [5] Eisenbeiser K, Finder J M, Yu Z, Ramdani J, Curlless J A, Hallmark J A, Droopad R, Ooms W J, Salem L, Bradshaw S, Overgaard C D 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 1324

- [6] Ahmet P, Koida T, Takakura M, Nakajima K, Yoshimoto M, Koinuma H, Tanaka M, Takeguchi M, Chikyow T 2002 *Appl. Surf. Sci.* **189** 307
- [7] Wei Y, Hu X M, Liang Y, Jordan D C, Craigo B, Droopad R, Yu Z, Demkov A, Edwards J L, Ooms W J 2002 *J. Vac. Sci. Technol. B* **20** 1402
- [8] McKee R A, Walker F J, Nardelli M B, Shelton W A, Stocks G M 2003 *Science* **300** 1726
- [9] Zhang X, Demkov A A, Li H, Hu X, Wei Y, Kulik J 2003 *Phys. Rev. B* **68** 125323
- [10] Li H, Hu X, Wei Y, Yu Z, Zhang X, Droopad R, Demkov A A, Edwards J, Moore K, Ooms W, Kulik J, Fejes P 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 4521
- [11] Forst C J, Ashman C R, Schwarz K, Blochl P E 2004 *Nature* **427** 53
- [12] Yakovkin I N, Gutowski M 2004 *Phys. Rev. B* **70** 165319
- [13] Yu Z, Liang Y, Overgaard C, Hu X, Curless J, Li H, Wei Y, Craigo B, Jordan D, Droopad R, Finder J, Eisenbeiser K, Marshall D, Moore K, Kulik J, Fejes P 2004 *Thin Solid Films* **462-463** 51
- [14] He J Q, Jia C L, Vaithyanathan V, Schlom D G, Schubert J, Gerber A, Kollstedt H H, Wang R H 2005 *J. Appl. Phys.* **97** 104921
- [15] Kourkoutis L F, Hellberg C S, Vaithyanathan V, Li H, Parker M K, Andersen K E, Schlom D G, Muller D A 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 036101
- [16] Mi S B, Jia C L, Vaithyanathan V, Houben L, Schubert J, Schlom D G, Urban K 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 101913
- [17] Wang X F, Wang J, Li Q, Moreno M S, Zhou X Y, Dai J Y, Wang Y, Tang D 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 085409
- [18] Ma J H, Sun J L, Meng X J, Lin T, Shi F W, Chu J H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1390 (in Chinese) [马建华、孙璟兰、孟祥建、林铁、石富文、褚君浩 2005 物理学报 **54** 1390]
- [19] Ma J H, Meng X J, Lin T, Liu S J, Zhang X D, Sun J L, Chu J H 2005 *Chin. Phys.* **14** 2352
- [20] Mann R W, Clevenger L A, Agnello P D, White F R 1995 *IBM J. Res. Dev.* **39** 403
- [21] Wang T, Oh S Y, Lee W J, Kim Y J, Lee H D 2006 *Appl. Surf. Sci.* **252** 4943
- [22] Alessandrino M S, Privitera S, Grimaldi M G, Bongiorno C, Pannitteri S, La Via F 2004 *J. Appl. Phys.* **95** 1977
- [23] Jeon H, Yoon G, Nemanich R J 1997 *Thin Solid Films* **299** 178
- [24] Yang W, Jedema F J, Ade H, Nemanich R J 1997 *Thin Solid Films* **308** 627
- [25] Ezo K, Kuriyama H, Yamamoto T, Ohara S, Matsumoto S 1998 *Appl. Surf. Sci.* **130** 13
- [26] Medeiros-Ribeiro G, Ohlberg D A A, Bowler D R, Tanner R E, Briggs G A D, Williams R S 1999 *Surf. Sci.* **431** 116
- [27] Briggs G A D, Basile D P, Medeiros-Ribeiro G, Kamins T I, Ohlberg D A A, Williams R S 2000 *Surf. Sci.* **457** 147
- [28] Oh J, Meunier V, Ham H, Nemanich R J 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 3332
- [29] Zhao F Z, Cui X F, Wang B, Hou J G 2006 *Appl. Surf. Sci.* **253** 2785
- [30] Yang T H, Chi K S, Chen L J 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 034302
- [31] Toramaru M, Iida T, Sato K, Ohno S, Shudo K, Morikawa Y, Tanaka M 2008 *J. Phys. : Condens. Matter* **20** 485006
- [32] Wang P Y, Yang C, Li L C, Li Y R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2340 (in Chinese) [王佩怡、杨春、李来才、李言荣 2008 物理学报 **57** 2340]
- [33] Du W H, Wang B, Xu L, Hu Z P, Cui X F, Pan B C, Yang J L, Hou J G 2008 *J. Chem. Phys.* **129** 164707
- [34] Goncharova L V, Starodub D G, Garfunkel E, Gustafsson T, Vaithyanathan V, Lettieri J, Schlom D G 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 014912
- [35] Berti M, Drigo A V, Cohen C, Siejka J, Bentini G G, Nipoti R, Guerri S 1984 *J. Appl. Phys.* **55** 3558

# Initial growth of SrTiO<sub>3</sub> on Sr/Si(001) studied by scanning tunneling microscope\*

Qiu Yun-Fei Du Wen-Han Wang Bing<sup>†</sup>

(Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 14 May 2010; revised manuscript received 30 June 2010)

## Abstract

SrTiO<sub>3</sub> ultra-thin film was deposited on the Sr/Si(001) surface using pulsed laser deposition (PLD) at room temperature and studied using scanning tunneling microscopy (STM). After annealing at 660 °C for about 60 minutes in ultrahigh vacuum (UHV), nanosize islands were formed on the Sr/Si(001) surface. High resolution STM images and dI/dV mapping of islands on Sr/Si(001) were obtained. The islands can be attributed to TiSi<sub>2</sub> islands with C49 and C54 structures. The existence of Sr on Si is not sufficient to prevent the reaction between Si and Ti in preparation of ultra-thin SrTiO<sub>3</sub> films.

**Keywords:** pulsed laser deposition (PLD), scanning tunneling microscope (STM), SrTiO<sub>3</sub>, C54-TiSi<sub>2</sub>

**PACS:** 68.37.Ef, 81.16.-c, 61.46.Df

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60771006).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: bwang@ustc.edu.cn