

硅烯：一种新型的二维狄拉克电子材料

陈岚[†] 吴克辉^{††}

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2013-07-11 收到

[†] email: lchen@iphy.ac.cn

^{††} email: khwu@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130901

Silicene: a new 2-dimension Dirac electron system

CHEN Lan[†] WU Ke-Hui^{††}

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 硅烯是单原子层的硅薄膜，其结构与石墨烯类似，由于其奇特的物理性质特别是狄拉克—费米特性，在近年来引起了人们的关注。文章简要介绍了硅烯这一全新的二维体系在实验上的一些进展，包括实现硅烯在表面上的外延生长，重构的结构表征和相变，狄拉克电子特性的证实，以及可能具有的超导转变等。

关键词 硅烯，二维体系，狄拉克—费米子，超导，石墨烯

Abstract Silicene, a single layer of thin film consisting of silicon atoms with honeycomb structures similar to graphene, has been attracting much attention because of its extraordinary physical properties, in particular its Dirac fermion characteristics. We shall review the recent progress in experimental research on silicene, including its successful epitaxial growth on surfaces, characterization of its structure, determination of the existence of Dirac fermions, and observation of possible superconductivity.

Keywords silicene, two-dimensional system, Dirac fermion, superconductivity, graphene

1 背景简介

1.1 硅烯的前期理论研究

石墨烯，即单层的石墨，是由碳原子构成的蜂窝状结构的单原子层二维材料，也是近10年来最引人关注的热点材料。它除了是第一种真正意义上的二维材料之外，另一个最有意思的特性是其电子的狄拉克—费米子特性，即在低能处，电子能带是用相对论的狄拉克方程来描述，而不是薛定谔方程^[1]。因此石墨烯的电子表现为无质量的狄拉克—费米子。电子的能带结构表现为在布里渊区中有6个狄拉克锥。因此，石墨烯具有高载流子迁移率和电导率，这促使人们考虑如何将

其应用到微电子工业中去。但将碳原子构成的石墨烯与以硅为基础的现代电子工业结合起来，中间还存在不小的技术障碍。从另一个角度考虑，硅原子与碳原子均为四主族元素，那么硅本身能形成类似于石墨烯的单原子层二维薄膜——硅烯吗^[2]？在自然界中，石墨是碳最稳定的结构形式，这是由于碳—碳键主要采取 sp^2 杂化的形式，键角为 120° ，碳原子均在一个平面内， π 电子在整个平面内非局域化。而硅—硅键比C—C键要弱，其键长也要长得多(0.23 nm)，硅最稳定的结构是以 sp^3 杂化的硅—硅键连接构成的正四面体金刚石结构， sp^2 杂化构成的二维平面结构并不存在。早在石墨烯成为研究热点以前，Takeda等人就研究过四主族元素(碳、硅、锗等)能否形成单原子层结构^[3]。密度泛函理论(DFT)计算发现，与石墨烯的

平面蜂窝状结构不同,硅和锗倾向形成非共面的翘曲结构,即六元环中有3个原子向上翘曲,结构的对称性由 D_{6h} 变为 D_{3d} 。这一理论结果当时并未引起多少关注。而在石墨烯被发现并成为研究热点之后,人们重新对硅的二维结构产生了浓厚的兴趣。Cahangirov等人重新对此作了计算,重复了这个结果,而且指出介于Si(111)的金刚石结构(sp^3)和完全平面的结构(sp^2)之间的低翘曲度结构最为稳定(见图1),上下层原子之间的纵向间距为 0.4 \AA ,形成了 sp^2 和 sp^3 杂化轨道混合的情况。同时,电子结构的计算表明,翘曲结构的硅烯也是理想的狄拉克电子系统:布里渊区中的 k 点有狄拉克锥的存在^[4]。很明显,这是由于 sp^2 杂化的轨道所贡献出来的。这意味着,过去10年内在石墨烯中所发现的(或预言的)基于狄拉克电子的种种新奇量子现象,都可以在硅烯中获得。

更进一步,中国科学院物理研究所的姚裕贵教授(现单位为北京理工大学)等人对硅烯的计算结果^[5, 6]指出,由于翘曲结构的存在,硅原子的自旋轨道耦合会使得硅烯的狄拉克点处打开一个 1.55 meV 的能隙,这比石墨烯中由于自旋轨道耦合而打开的能隙(μeV)要大得多。最初量子自旋霍尔效应的描述是以石墨烯为模型^[7],但由于其自旋轨道耦合强度太小,无法在实验上实现。硅烯和石墨烯有着同样的结构,同样的狄拉克电子系统,也有着相同的非平庸拓扑不变量。而较大的自旋轨道耦合强度,无疑使得硅烯可能在液氮温度下就能实现量子自旋霍尔效应。因此,硅烯是全新的二维拓扑绝缘体,其手性的边缘态允许极化的自旋流通过。有人指出,在门电压调控下,硅烯可以用来产生近100%自旋极化的电子^[8]。有理论研究指出,在外加电场和交换场的情况下,可以实现各种可调的量子效应,其中包括量子反常霍尔态、谷极化金属态等等^[9]。用圆偏振光照射硅烯,可实现不同拓扑对称性的拓扑绝缘态^[10]。

硅烯的这些新奇物理性质无论是对将来的工业化应用还是基础物理研究来说都有着非常重要的意义,从而使硅烯有希望成为下一个低维体系的研究热点。但对于物理学家来说,理论预言再

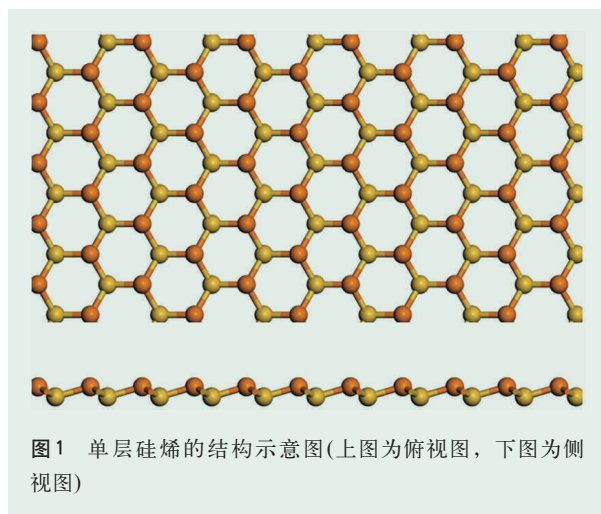


图1 单层硅烯的结构示意图(上图为俯视图,下图为侧视图)

漂亮,没有实验数据支持,再热门的研究也持续不下去。因此,对硅烯这一领域的研究而言,最迫切的是首先应该将其制备出来。

1.2 硅烯的前期实验探索

最早对硅烯制备的探索是由H.Nakano等人采用化学剥离 CaSi_2 的办法进行的^[11]。 CaSi_2 由 Ca^{2+} 层和蜂窝状结构的Si层交替构成。为了降低 Ca^{2+} 层与Si层之间的静电相互作用,他们掺入Mg原子,然后将 $\text{CaSi}_{1.85}\text{Mg}_{0.25}$ 浸入盐酸正丙胺溶液中, Ca^{2+} 离子从材料中析出, Si层被剥离。虽然原子力显微镜观察的结果显示确实得到了单原子层的薄膜,但电子衍射和X射线光电子能谱学(XPS)的结果显示该薄膜并非硅烯,而是硅氧化后的某种混合结构。由于硅在大气中容易氧化,大气下的制备方法显得并不合适,在超高真空环境下用分子束外延的办法在衬底上进行外延生长,可以有效地避免氧化,也是后来研究人员采用的主要办法。

Lalmi等人于2010年第一个宣称在Ag(111)上长出单层的硅烯^[12],主要判断依据是用扫描隧道显微镜(STM)看到了完美的蜂窝状结构。但他们测量的Si—Si键长为 0.19 nm ,比硅金刚石结构中的值(0.235 nm)和硅烯的理论计算值($0.22\text{—}0.24 \text{ nm}$)要小得多。而且在这之后的两年时间内,国际上没有一个组能重复出这个结果。直到2012年,Le Lay等人发表文章^[13],认为Lalmi等人看

到的蜂窝状结构实际上是 Ag(111) 表面的原子结构，这是由于 STM 的针尖效应，有时候原本突起的部分会显示为凹陷。他们也给出了纯 Ag(111) 表面由于针尖效应而得到的 STM 形貌图，与 Lalmi 等人得到的结果一致。实际上，硅在 Ag(111) 表面上的生长情况很复杂，在不同的覆盖度和衬底温度下，硅在 Ag(111) 表面上会表现为不同的重构。

2 硅烯的生长制备和结构

2.1 Ag(111) 表面

前文提到，在理论计算中得到的能量上稳定的单原子层硅烯，其结构为低翘曲度的蜂窝状结构，对称性比石墨烯低。当在衬底上外延生长硅烯时，由于受到较强的界面相互作用，硅烯会出现重构，原子的翘曲程度会发生变化，有些原子会上升，有些原子会下降，导致元胞变大，对称性会进一步降低。我们发现，在超高真空分子束外延生长过程中，当衬底温度低于 500 K 时，硅原子在 Ag(111) 表面上会表现出多种不同周期的结构相，如 (4×4) ， $(\sqrt{13} \times \sqrt{13})$ ， $(2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3})$ ， $(\sqrt{7} \times \sqrt{7})$ (相对于 Ag(111) 的 1×1 结构) 等^[14] (见图 2)。有

人认为这些结构相都是单层硅烯，只是由于硅烯与 Ag(111) 的相对位置不一样，从而出现了不同的公度^[15-17]。但我们认为，至少其中的某些结构，例如 4×4 和 $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ 结构也可能是由硅形成的其他二维有序排列，并非硅烯。另一方面，这些结构相与 Ag(111) 表面晶格之间存在公度，这也说明它们之间的相互作用比较强，即使这些结构相是硅烯，重构后的结构会导致硅烯中 sp^2 和 sp^3 杂化轨道的比例发生变化，从而影响到其电子结构，特别是电子的狄拉克—费米特性。

为了降低薄膜与衬底的相互作用，我们把衬底的温度提高到 500 K，这时 Ag(111) 表面上会出现一种大面积的单层有序结构，而且该薄膜跨过 Ag(111) 的台阶时也能保持结构的连续性，体现了良好的稳定性和完整性^[18] (见图 3)。高分辨的 STM 形貌图显示该薄膜为完美的蜂窝状结构，但其周期为 0.64 nm，正好是硅烯 1×1 结构 (0.38 nm) 的 $\sqrt{3}$ 倍，我们命名为 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构。与低衬底温度下得到的几种结构相不同， $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构与 Ag(111) 的晶格之间没有公度，低能电子衍射 (LEED) 也显示 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构相对于 Ag(111) 表面的高对称方向有 4 种不同的角度： 0° ， $\pm 10^\circ$ 和 30° ，

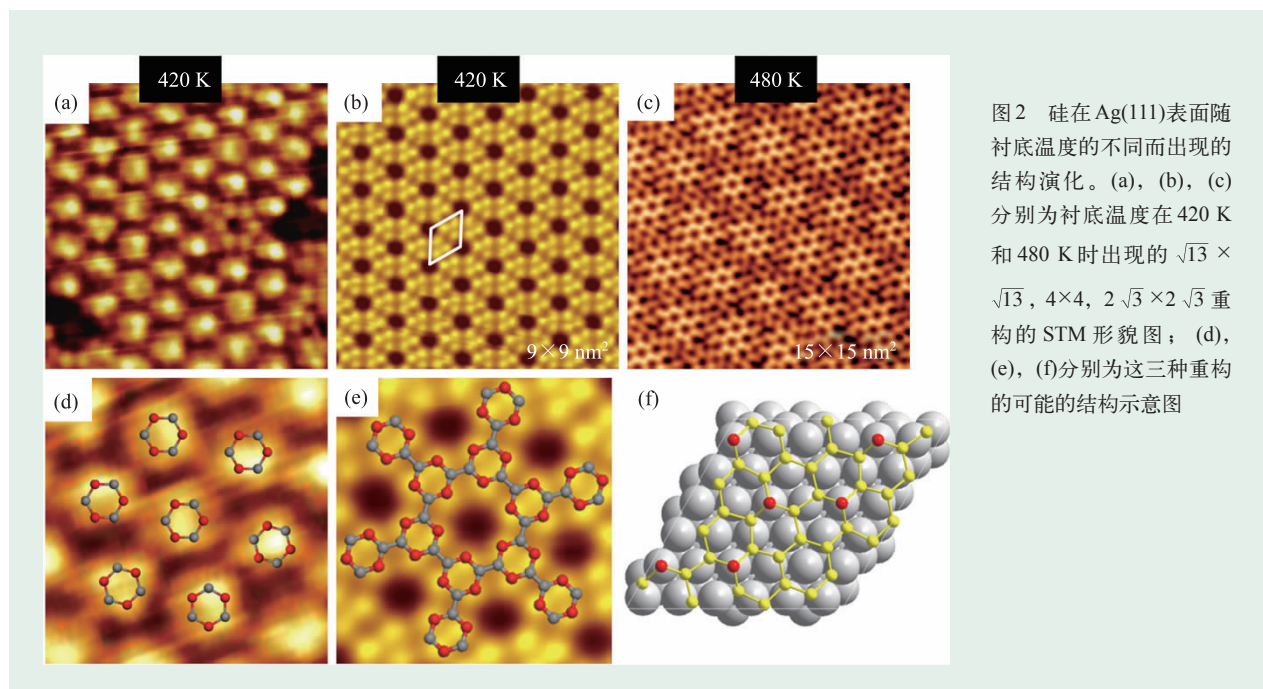


图 2 硅在 Ag(111) 表面随衬底温度的不同而出现的结构演化。(a), (b), (c) 分别为衬底温度在 420 K 和 480 K 时出现的 $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ ， 4×4 ， $2\sqrt{3} \times 2\sqrt{3}$ 重构的 STM 形貌图；(d), (e), (f) 分别为这三种重构的可能的结构示意图

这也表明该结构与衬底的相互作用不强^[19]。

到底这个薄膜是不是硅烯呢？我们尝试用传统的密度泛函理论框架下的局域密度近似(LDA)和广义梯度近似(GGA)去计算 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 的结构信息，但无法得到与实验相吻合的结果。不过，我们发现在液氮温度下， $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构会经历一个结构相变，由原来的蜂窝状结构变为两种镜面对称的菱形结构^[19](见图4)。在蜂窝状结构中，六元环中每个原子的亮度一样；在相变后菱形结构的六元环中，相邻的原子亮度变得不同。我们猜测，这种低温下的菱形结构可能是最基本的结构，再考虑到 Ag 衬底与 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构之间较弱的相互作用，于是我们采用了最近发展的色散力修正的密度泛函理论，它能较好地描述非局域的范德瓦尔斯相互作用。结构优化的结果表明，这个薄膜确实是硅烯，只不过它自动弛豫成两种镜面对称的菱形 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构：在每个 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 元胞中，只有一个硅原子向上翘曲，且该硅原子的翘曲程度(1.2 Å)远大于 1×1 结构中的硅原子(0.4 Å)，而另外5个原子则保持同样高度，这说明 sp^2 杂化轨道的比例仍然很高。我们还注意到，向上翘曲的硅原子可以在表面上的任何位置，如 Ag 原子的顶位、桥位和中空位等，这说明硅原子与衬底的相互作用是非局域的，也正好体现了弱范德瓦尔斯相互作用的特征，而且与我们的实验现象也相吻合。

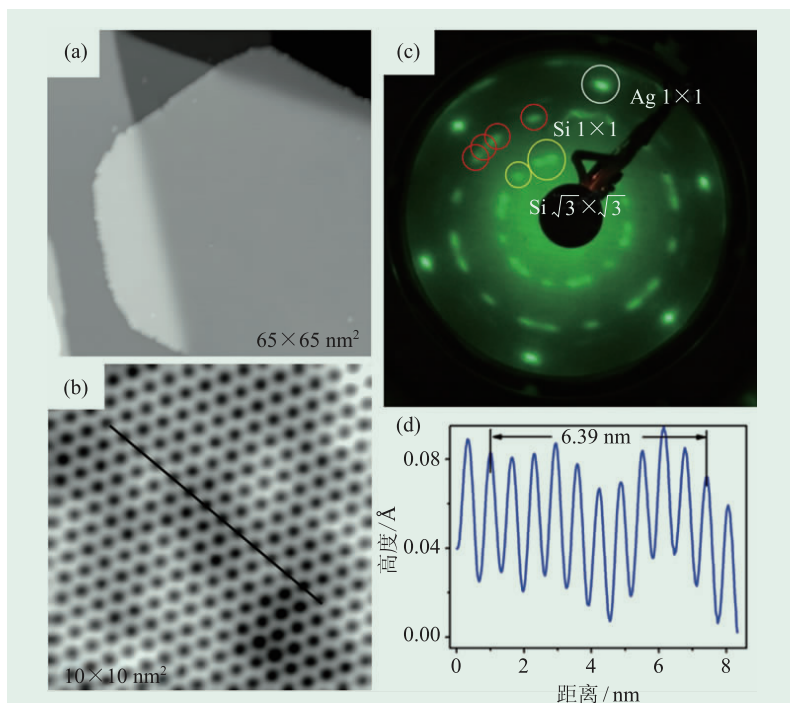


图3 (a)在衬底温度为500 K时得到的单层硅烯薄膜的STM形貌图；(b)硅烯的高分辨STM形貌图，显示了完美的蜂窝状结构；(c)Ag(111)表面上单层硅烯薄膜的低能电子衍射(LEED)图；(d)为(b)中沿着黑色实线的轮廓线，显示了结构周期的大小

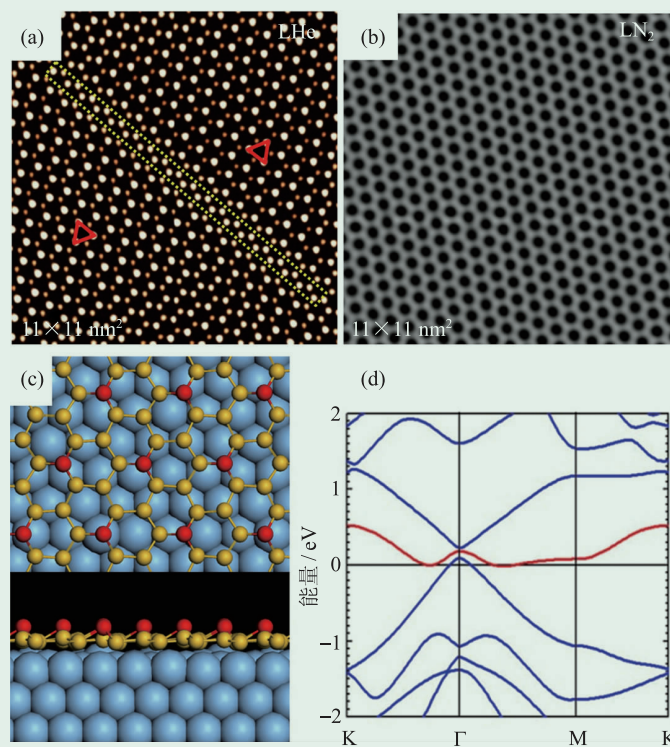


图4 (a)和(b)分别为在液氦和液氮温度下硅烯的高分辨STM形貌图，(a)中黄色方框内标注的是畴界位置，两个红色三角形标注相邻畴界中不同的菱形结构；(c)理论计算得到的菱形结构的结构示意图，上图为俯视图，下图为侧视图；(d)理论计算菱形结构的电子结构

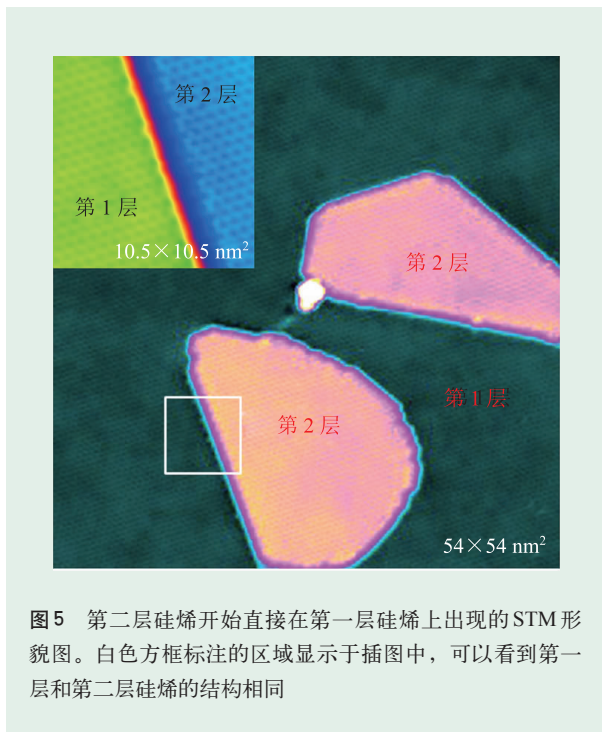


图5 第二层硅烯开始直接在第一层硅烯上出现的STM形貌图。白色方框标注的区域显示于插图中，可以看到第一层和第二层硅烯的结构相同

这是首次真正制备出单层的硅烯薄膜，无论在实验上还是理论计算上都非常完美地证明了硅烯的独特结构。材料问题的解决无疑为硅烯的物性研究和应用研究的开展奠定了基础。虽然在Ag(111)表面出现了 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 的重构，但其 sp^2 杂化轨道的比例仍然很高。而且这种薄膜与金属衬底的相互作用是比较弱的范德瓦尔斯相互作用，说明其受到的界面相互作用比较弱，有利于保持其狄拉克的电子特性。这一点我们将会在下节重点介绍。

继续增加硅原子的覆盖度，同样保持500 K的衬底温度，第二层硅烯开始在单层硅烯薄膜的表面上生长^[14]。同时，我们发现第二层硅烯仍然保持 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构(见图5)。事实上，我们生长了数十层的硅烯，发现其仍然保持 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构，目前还不知道这种结构的硅烯薄膜的极限厚度是多少，多少层以后会转变为硅的金刚石结构？这也是一个很有意思的研究课题。此外，这种以 sp^2 杂化轨道为主的多层硅烯薄膜很明显区别于硅的金刚石结构，可以被认为是一种全新的硅的同素异形体。

2.2 其他表面

除了Ag(111)表面适合硅烯生长外，中国科学院物理研究所的高鸿钧院士研究组最近也报道了在Ir(111)表面上成功地实现了硅烯的生长^[20]。他们发现Ir(111)表面的硅表现为 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 重构的硅烯。虽然Ir(111)表面上的硅烯周期(0.72 nm)要比Ag(111)表面上的(0.64 nm)大，但整个硅烯的结构仍然保持连续性和完整性，这充分说明了硅烯结构的稳定性。

虽然大部分研究工作集中在金属衬底上生长硅烯，但绝缘体或半导体衬底上实现硅烯的生长对将来的器件应用比较有利。Fleurence等人实现了在Si(111)表面的二硼化锆(ZrB_2)(0001)薄膜上生长单层的硅烯^[21]。他们并非是直接把硅生长在 ZrB_2 表面上，而是在Si(111)表面生长的 ZrB_2 薄膜上发现了一种 2×2 的重构，他们认为这是硅原子从Si(111)衬底上析出到 ZrB_2 薄膜表面上而形成的。 ZrB_2 (0001)表面 2×2 重构的周期与硅烯 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 重构的周期大小吻合。在三个不同周期的表面(Ag(111)、Ir(111)和 ZrB_2 (0001))表面都发现了硅烯的 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 重构，说明这种重构可能是硅烯的一种固有特性。

这些结果表明，硅烯的翘曲结构较容易受到硅烯与衬底相互作用的影响而发生变化，从而产生重构，与此相对应的是，其电子结构也应该较自由硅烯的 1×1 结构有所改变。这为将来通过结构调控电子能带提供了一种可能性的方法。

3 硅烯的物性表征

3.1 电子结构

硅烯与石墨烯一样，均为蜂窝状结构，虽然由于较长的硅—硅键长和部分 sp^3 杂化轨道的引入，导致其表现为非共面的翘曲结构，但理论计算仍然表明，硅烯的 π 和 π^* 能带在布里渊区的 k 和 k' 点费米能级处交叉，在交叉处附近，能带表

现为线性色散，费米速度为 10^6 m/s，这与石墨烯能带结构相似^[4]。因此，在 k 和 k' 处的电子行为可以用非相对论的狄拉克理论来描述。但是，由于翘曲结构会使得硅烯中的自旋轨道耦合(SOC)较强，SOC会导致在狄拉克点处打开一个能隙，其大小为 1.55 meV，这使得硅烯中的载流子应该是有质量的狄拉克—费米子，因此有人认为硅烯可以在实验上被用来实现量子自旋霍尔效应^[5]。通过应力的作用控制翘曲结构的变化，可以获得对能隙大小的调控^[5]。施加电场或在偏振光的照射下，也可以对硅烯的能带结构进行调控，实现许多新奇的量子效应，如量子化反常霍尔绝缘体 (quantum anomalous Hall insulator)，谷极化金属 (valley polarized metal) 等^[9, 10]。

虽然在理论计算中，硅烯有着非常独特的电子特性，但在实验上我们需要首先证实其电子的狄拉克—费米特性的存在。Vogt 等人利用角分辨光电子能谱 (ARPES) 对 Ag(111) 表面上硅烯的 4×4 重构进行了研究，发现了一只向下线性色散的能带 (他们认为这是狄拉克锥的一半)，并认为这是狄拉克—费米子存在的证据^[22]。但仅观察到一半能带的线性色散并不足以证明硅烯的狄拉克电子特性，Lin 等人利用 STM 研究了硅烯的 4×4 重构的量子霍尔效应^[23]，发现在磁场下 (0—7 T) 没有观察到朗道能级，这说明这种重构没有非局域的表面电子态。他们也用 DFT 计算了 4×4 重构的电子结构，并没有看到类似于 1×1 结构中的狄拉克锥，由此做出结论，认为 Vogt 等人看到的线性能带并非硅烯的狄拉克锥，而是来自 Ag 衬底的体能带。

我们认为，Ag(111) 表面上硅烯的 4×4 重构来源于硅烯与 Ag 表面晶格之间的公度，这说明硅烯与衬底之间的界面作用比较强。较强的界面作用会使得结构对称性降

低，出现重构， sp^3 杂化轨道成分增多，从而破坏了硅烯的狄拉克—费米特性。我们也在实验上通过扫描隧道谱 (STS) 研究了 Ag(111) 表面 4×4 和 $\sqrt{13} \times \sqrt{13}$ 等重构的电子结构，在较大能量范围内也没有观察到电子驻波，这说明这些重构的电子态受到了 Ag(111) 表面较大的影响，同样，Chippa 等人^[24] 和 Wang 等人^[25] 也得到了类似的结论。

但是，Ag(111) 表面上 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 重构的硅烯的情况有所不同，我们在上一节已经提到，该重构的形成并非来自于硅烯与 Ag 表面之间的公度，而且硅烯与 Ag(111) 表面之间的作用是较弱的范德瓦尔斯力，应该有可能保持硅烯中电子的狄拉克—费米特性。

我们利用 STS 研究了 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 重构的电子结构^[18]。通常 STM 只能得到实空间的和能量空间的信息，无法直接研究电子能带在倒空间的色散情况。为了得到在倒空间电子波矢的信息，我们研究表面电子在缺陷处的弹性散射情况。在电子行进过程中，遇到缺陷，被缺陷处的势垒散射，入射波和散射波之间会发生干涉，形成驻波。驻波

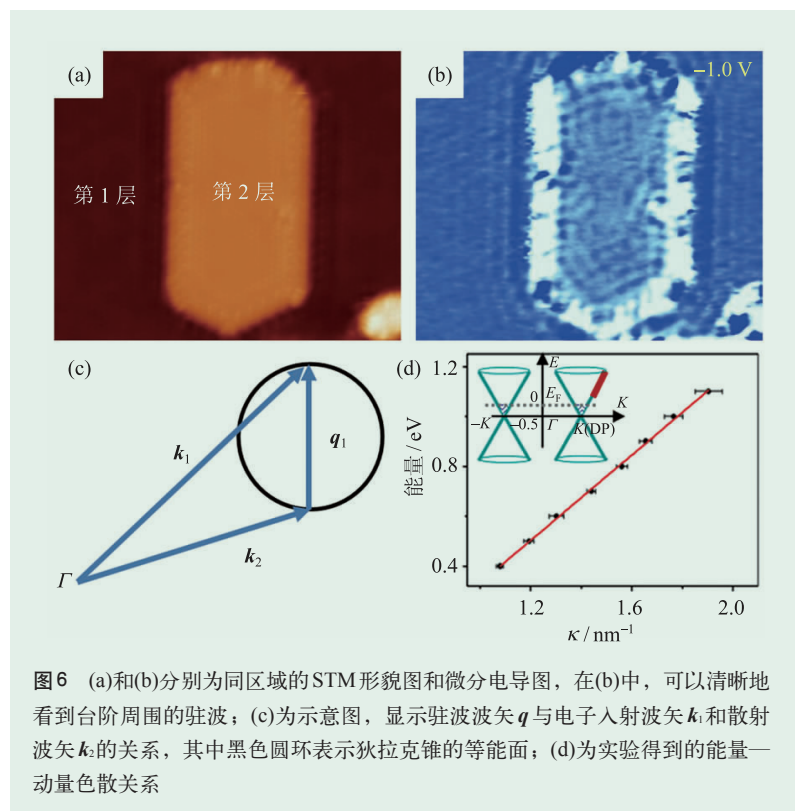


图6 (a)和(b)分别为同区域的STM形貌图和微分电导图，在(b)中，可以清晰地看到台阶周围的驻波；(c)为示意图，显示驻波波矢 q 与电子入射波矢 k_1 和散射波矢 k_2 的关系，其中黑色圆环表示狄拉克锥的等能面；(d)为实验得到的能量—动量色散关系

的波矢 $q = k_1 - k_2$ ，其中 k_1 和 k_2 分别为电子的入射和散射波矢。驻波的波矢大小是可以直接在STM图中进行测量的，这样我们能通过获得驻波的波矢来间接了解电子的色散情况，这种方法最早被Crommie等人应用到贵金属表面理想二维电子气的测量^[26]，后来也被应用到石墨烯^[27]和三维拓扑绝缘体^[28]等狄拉克电子系统的测量。如果硅烯的电子结构与石墨烯类似，那么能带的等能面应该表现为存在于布里渊区 k 点的圆环。如图6(c)所示，驻波的波矢大小等于圆环的直径： $q = 2\kappa$ ， κ 为等能面的半径。如果狄拉克锥存在，那么等能面(圆环)的半径随能量的变化应该是线性的。我们通过测量不同能量下台阶附近驻波的波长，可以得到波矢 q ，进而画出等能面半径 κ 与能量 E 的关系，通过拟合发现这正好是线性的(见图6)，符合狄拉克的电子特性，并且费米速度 $V_F \sim 10^6$ m/s，与理论计算值相吻合。这也是第一次真正证明硅烯 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构确实存在狄拉克电子特性，展示了硅烯与石墨烯有着相同的应用前景，为人们开展硅烯的研究提供了信心和保障。同时这个结果也证明了唯有硅烯的 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构相才能保持狄拉克-费米型的电子特性。

Ag(111)表面上 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 重构的硅烯在液氮温度下会发生结构相变，由蜂窝状结构变为菱形结

构。在5 K和77 K温度下测量的STS没有任何区别。同时电子驻波的测量都能得到线性的能量-动量色散关系，而且费米速度一致，说明硅烯的结构相变对电子结构没有影响。我们也用DFT计算了硅烯的 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 菱形结构的电子态^[19](见图4(d))，发现虽然这种重构中硅原子的翘曲程度较大，但由于发生翘曲的硅原子数目较少(1/6)，大部分原子保持 sp^2 杂化的平面结构，所以仍然保持着狄拉克锥的结构。同时，与 1×1 结构不同，由于高翘曲原子的出现，使得狄拉克点处打开一个较大的能隙(0.15 eV)，使得硅烯由金属性转变为半导体性，这无疑有利于将来的器件应用。

此外，在我们之后，Padova等人用角分辨光电子能谱(ARPES)也在Ag(111)表面上 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 重构的硅烯中观察到了线性的狄拉克锥^[29]。这些研究表明， $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构的硅烯能保持硅烯的狄拉克-费米特性，是研究硅烯新奇量子特性的理想系统。此外，Fleurence等人利用角分辨光电子能谱研究了在ZrB₂(0001)薄膜表面得到的硅烯^[21]，发现其电子能带有些类似于由 π 轨道组成的狄拉克锥，说明了即使是受到衬底界面作用的影响形成了高翘曲度的结构，硅烯的 sp^2 能带仍然能够保存下来。

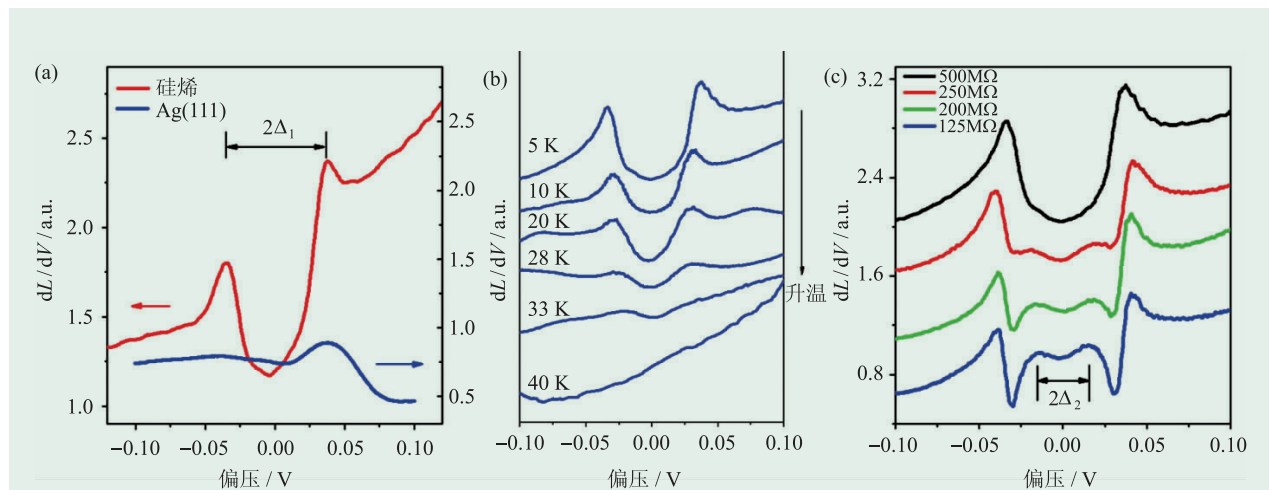


图7 (a)在液氮温度下得到的单层硅烯(红色)和Ag(111)表面(蓝色)的扫描隧道道谱；(b)在不同温度下获得的单层硅烯的扫描隧道道谱；(c)在不同隧道电阻下得到的单层硅烯的扫描隧道道谱

3.2 可能性的超导相变

除了验证 Ag(111)表面上 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 重构的硅烯具有狄拉克电子特性以外,我们还发现硅烯可能具有其他新奇的量子效应。例如,我们在液氮温度下的 STS 测量中,发现费米能级处有一个 70 meV 的能隙(见图 7),并且能隙两端可以观察到相干峰,当温度升高时,能隙宽度变小,直到消失,转变温度大概在 35—40 K 左右。这似乎表明,在 Ag(111)表面上的硅烯会有一个超导转变,观察到的能隙有可能是超导能隙^[30]。如果这真是超导现象,硅烯将是超导温度最高的单质超导体。当减小隧道结,增加隧道电导时,我们还发现能隙内的电导会增加,这可能是安德烈夫反射(Andreev reflection)现象,并在费米能级处出现另一个小能隙,说明硅烯有可能是双能隙的超导体。在 2006 年,曾有人报道对块体的硅进行重掺杂,提高其电子浓度,可以实现超导,但超导转变温度只有 0.35 K,这无疑对现实应用没有什么帮助。如果在硅烯如此简单的体系中发现高转变温度的超导现象,有可能将硅半导体工业与超导电性结合起来,给硅烯开拓新的应用领域,激发了人们对硅烯的研究热情,而且给解决目前悬而未决的高温超导机制提供了一种新的参考,为寻找新的高温超导体提供了一种新的

捷径。同时,超导现象和硅烯的二维拓扑绝缘体的性质结合起来,可能实现其他新奇的量子效应,如可用来寻找马约拉纳(Majorana)费米子的存在^[31]。当然,仅靠扫描隧道显微谱中的能隙不能证实这是超导现象,要证实超导需要在宏观输运测量中观察到零电阻现象,或者在磁场下观察到迈斯纳效应。而这是我们将来工作的一个重要方向。

4 结论和展望

目前,在不同的金属和半导体表面上都实现了硅烯的生长制备,由于硅烯与衬底的界面相互作用以及硅烯翘曲结构的易调控性,外延生长的硅烯会出现不同周期的重构。在这些重构中,只有 Ag(111)表面的 $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ 结构的硅烯表现出较为奇异的物理特性,不但能保持理论预言的电子的狄拉克—费米特性,而且在低温下观察到了有可能是超导转变的现象。前者证实了人们对硅烯的理论预言,显示了硅烯将来巨大的应用前景,为硅烯未来的发展扫清了疑惑;后者昭示了硅烯还具备着许多尚未发现的新奇物性,在基础物理研究中也大有用武之地。硅烯的实验研究工作还只是刚刚展开,还有大量的物理问题需要去探索,可以期望在不久的将来,硅烯的研究发展会成为不逊色于石墨烯的研究领域。

参考文献

- [1] Castro Neto A H, Guinea F, Peres N M R *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2009, 81: 109
- [2] Guzman-Verri G G, Voon L C L. *Phys. Rev. B*, 2007, 76: 075131
- [3] Takeda K, Shiraishi K. *Phys. Rev. B*, 1994, 50: 14916
- [4] Cahangirov S, Topsakal M, Akturk E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102: 236804
- [5] Liu C C, Feng W X, Yao Y G. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 107: 076802
- [6] Liu C C, Jiang H, Yao Y G. *Phys. Rev. B*, 2011, 84: 195430
- [7] Kane C L, Mele E J. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95: 226801
- [8] Tsai W F, Huang C Y, Chang T R *et al.* *Nature Commun.*, 2013, 4: 1500
- [9] Ezawa M. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 109: 055502
- [10] Ezawa M. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 026603
- [11] Nakano H, Mitsuoka T, Harada M *et al.* *Angew Chem.*, 2006, 118: 6451
- [12] Lalmi B, Oughaddou H, Enriquez H *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97: 223109
- [13] Le Lay G, Padova P D, Resta A *et al.* *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012, 45: 392001
- [14] Feng B J, Ding Z, Meng S *et al.* *Nano Lett.*, 2012, 12: 3507
- [15] Enriquez H, Vizzini S, Kara A *et al.* *J. Phys.: Condens. Matter*, 2012, 24: 314211

- [16] Kaltsas D, Tsetseris, Dimoulas A. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2012, 24: 442001
- [17] Jamgotchian H, Colignon Y, Hamzaoui N *et al.* *J. Phys.: Condens. Matter*, 2012, 24: 172001
- [18] Chen L, Liu C C, Feng B J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 109: 056804
- [19] Chen L, Li H, Feng B J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 085504
- [20] Meng L, Wang Y L, Zhang L Z *et al.* *Nano Lett.*, 2013, 13: 685
- [21] Fleurence A, Friedlein R, Ozaki T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 245501
- [22] Vogt P, Padova P D, Quaresima C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 155501
- [23] Lin C L, Arafune R, Kawahara K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 076801
- [24] Chiappe D, Grazianetti C, Tallarida G *et al.* *Adv. Mater.*, 2012, 24: 5088
- [25] Wang Y P, Cheng H P. *Phys. Rev. B*, 2013, 87: 245430
- [26] Crommie M F, Lutz C P, Eigler D M. *Nature*, 1993, 363: 524
- [27] Rutter G M, Crain J N, Guisinger N P. *Science*, 2007, 317: 219
- [28] Zhang T, Cheng P, Chen X *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 103: 266803
- [29] Padova P D, Vogt P, Resta A *et al.* *Appl. Rev. Lett.*, 2013, 102: 163106
- [30] Chen L, Feng B J, Wu K H. *Appl. Rev. Lett.*, 2013, 102: 086102
- [31] He J, Zhu Y X, Wu Y J *et al.* *Phys. Rev B*, 2013, 87: 075126

ILOPE—北京光电展

市
场
由
ILOPE-2013
而
宽
阔

www.ilope-expo.com
 垂询电话: 010-8460 0344

北京国际光电产业博览会 暨

第十八届中国国际激光·光电子及 LED 光电显示产品展览会

北京·中国国际展览中心(三元桥) 2013年10月16日-18日

<p>主办单位</p> <p>中国国际贸易促进委员会 中国国际展览中心集团公司 中国光学光电子行业协会</p> <p>承办单位</p> <p>中国光学光电子行业协会 中展集团北京华港展览有限公司</p>	<p>支持单位</p> <p>中国工业和信息化部 中国科技部 中国科学院 中国兵器工业集团公司 北京市科学技术委员会 北京光机产业基地 美国光电协会 日本产业技术振兴会 德国工商总会 德国光学、医疗精密设备协会 财团法人光电科技工业协会 北京市市政工程总公司(集团)</p> <p>展品范围</p> <p>激光与红外产品及设备 光电显示及照明 光电材料与元件 光学元件与材料 LED & OLED & FPD 光通讯设备</p>	
---	---	--