

## 轻巧灵动的未来

(中国科学院半导体研究所 姬扬 编译自 Nicola Townsend, Iddo Amit. *Physics World*, 2019, (1):35)

手机和电脑拥有强大的计算能力，但仍然是基于三维半导体的刚性物体。二维半导体可以制成有弹性的、可穿戴的电子设备。

在“二战”期间，英国军方几乎没有什么计算能力。用来破译德军密码的 Colossus 计算机，占据了一整套房间。

今天的小汽车比首次登月的阿波罗飞船的计算能力更强。相比之下，20年前的电脑就像来自石器时代，就连如今的电视、洗衣机和其他家用电器都塞满了芯片。

但是未来呢？还是随身携带电

子设备吗？能不能穿在身上或者植入体内呢？答案取决于半导体科技的持续进步——半导体兼有绝缘体和导体的特性，其导电性可以快速地开关。

低能量的价带和高能量的导带之间有“带隙”。给半导体施加某个方向的电场，可以让电荷获得能量、跨越带隙而前进。反转这个电场，电子就会失去能量，留在价带停滞不前。因此，半导体能够制成二极管、电容器、金属氧化物场效应晶体管乃至用于计算的逻辑门。

大多数场效应晶体管都是由三维的块状半导体（硅或砷化镓），利用先进的材料加工技术制成的纳米结构。它们的效率很高，然而却是刚性的、不透明的，很难植入到服装里。庆幸的是，有一类新材料可

能更适合制成穿戴式设备。例如，可在皮肤上佩戴的健康监测贴片，编织在套头衫里的智能手机或装在背包上的太阳能电池板。

### 瘦身

这些材料是层状半导体，可以用简单的方法得到只有几个原子厚的二维薄膜。例如，从石墨中剥离石墨烯的“苏格兰胶带法”，在液体中搅拌的“剪切剥离法”，以及化学气相沉积法。

这些新半导体是二维的，透明而有弹性，能够做成柔性存储设备和透明光电探测器等，集成到电子设备中。但这并不容易。这些新材料需要由金属电极连接，以便传送电流。

当二维半导体与金属连接时，两种材料的“功函数”不同，在界面处形成了“肖特基势垒”。在三维半导体里，利用化学掺杂可以克服这个势垒。但是在二维半导体中不能掺杂，因为外来杂质可以极大地改变材料的物理性质。

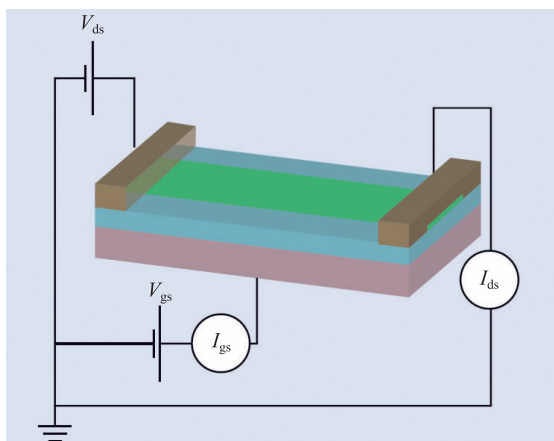


图1 一种场效应晶体管，由高掺杂硅衬底(粉红色)上的二维半导体 MoTe<sub>2</sub>(绿色)制成。衬底是晶体管的栅电极，二氧化硅表面层是栅极介电质。金属电极(棕色)用作源电极和漏电极。 $V$ 和 $I$ 是电压和电流

二维半导体的另一个问题是，电导率受到“表面态”的严重影响。这些态困住电子、降低了材料的电导率(依赖于陷阱的数量)。

这些表面态俘获传导电子、降低它们的密度和电流，被俘获的电子进而散射传导电子，增大了半导体“通道”的电阻。此外，表面电荷还改变了半导体的电容，使外部电场更难进入材料，降低了电场调控电流的能力。

为了探讨表面态如何阻碍传导，我们用 $\text{MoTe}_2$ 场效应晶体管做实验。 $\text{MoTe}_2$ 的带隙类似于硅，很容易做成薄层。用胶带从大块晶体上剥离出纳米级的 $\text{MoTe}_2$ 薄片，再转移到高掺杂的硅衬底上。衬底是晶体管的栅电极，氧化物层充当栅极介电层，然后在半导体片上制作金属电极(图1)。

### 惊喜，惊喜

我们做了两种不同的研究。第一个项目研究了各种金属和 $\text{MoTe}_2$ 通道在低温下形成的肖特基势垒(2D Mater. 5 025023)。我们特别想测量势垒的高度，想知道改变它是否影响电荷进入通道。

我们的假设是，通过改变金属电极，可以研究势垒的高度对传导的影响。但是发现了两个没有预期到的结果。

当温度低于80 K时，热能量不足以让电子克服势垒并传导，载流子就“冻结”在基态上。因此，我们怀疑 $\text{MoTe}_2$ 晶体管能否开启并传导电流。然而，即使在300 mK也能开启或关闭，还表现出“肖特基二极管”的所有响应特性。随后我们改变金属，通过量化肖特基势垒高度的微小变化来证实这个发现。

电荷通常有3种方式通过势垒



图2 基于二维半导体的可穿戴电子设备将应用于医药、消费品乃至军事等各个领域

进入通道：热离子发射、扩散和隧穿。有时候是三者的结合。在低温下，隧穿通常是主导机制，因为电子没有足够的能量跳过势垒。但我们惊讶地发现，热离子发射是电荷注入的主要方法。为了估计肖特基势垒高度，我们改变源电极和漏电极之间的电压，然后测量源漏电流。温度从80 K到40 K，钽电极的势垒变化了10 meV(钽电极是50 meV)。金属功函数的差别要大得多，因此调节肖特基势垒高度并不简单。

### 越过门槛

第二个项目探索了电荷“陷阱”的性质。这些现象发生在半导体通道中，陷阱破坏了晶格的周期性，限制了电子、增大了电阻(Adv. Mater. 29 1605598)。把栅偏压从“关闭”状态扫描到“开启”状态，然后再回来，我们发现了一种回滞现象：两个方向上的电流大小是不一样的。

当场效应管开启时，电荷陷阱捕获电子。当它关闭时，就会发射电子，从而减少测量的电流。电子的俘获和发射过程依赖于时间，出现了“瞬态”电流，其持续时间比体材料半导体长得多。这些电流随着时间的推移而变化。

我们观察到两种可能来自于俘

获电荷的瞬态电流。一种是发射电流，其大小不随施加的电压而变化；另一种电流随电压线性增加(符合欧姆定律)，这种电流从不出现在体材料半导体中，改变了开启场效应管所需的最小电压。令人惊讶的是，大部分的回滞都是由这种“阈值瞬态”造成的。

### 展望未来

这些实验探索了新型二维器件的基本物理机制，提供了控制电导的新方法。利用肖特基势垒，可以设计一种光电探测器，使得入射光子有足够的能量激发半导体中的电荷、并跃过势垒，但不足以从价带激发到导带。根据 $\text{MoTe}_2$ 器件中发现的势垒高度，这种材料可用于探测红外线，适合在恶劣条件下热成像。

新型的二维半导体器件既透明又有弹性，适合可穿戴电子产品。石墨烯已经成功地结合到纤维上(Sci. Rep. 7 4250)，而其他材料可以使纺织品具有计算能力，甚至储存能量、取代笨重的电池。减少传感器和计算设备的能量需求和物理尺寸，下一代的可穿戴电子设备可以改变科学家乃至士兵的野外生存方式。相比于“二战”中的计算机，更是天差地别了。