

“旋”酷的超算

(中国科学院物理研究所 万蔡华、韩秀峰 编译自 Niladri Banerjee. *Physics World*, 2019, (4): 31)

Niladri Banerjee 解释新兴的超导自旋电子学如何帮助实现更加节能的绿色超级计算机。

顶点(Summit)——世界上运行速度最快的超级计算机(简称超算),坐落于美国田纳西州橡树岭国家实验室,每秒可执行20亿亿次浮点运算,当之无愧计算机中的巨兽。它如此庞大,以至于两个篮球场才能装得下。它亦如此昂贵,造价高达2亿美金。在中美超算竞争日趋白热化的大背景下,去年一经公布,美国“顶点”便超越了曾经的王者——中国的神威太湖之光。

顶点主要面向诸如基因工程和气候预测等大数据方面的应用。它也可堪称首台人工智能(AI)超算,可为发展新的癌症治疗方案、设计先进材料以及理解阿尔兹海默症(俗称老年痴呆)的病因等重大研究课题提供帮助。但使用顶点开展上述研究的成本也异常高昂,其所需电力不亚

于一座小型城镇。跟其他超算类似,这些电能最终变成了热,消耗掉了。

这便引发另一个问题:即便使用最先进的水冷技术,为了将超算维持在其合适的工作温度,工程师们也需要奇思妙想,付出极大的努力才能办到。虽然很难估算顶点到底产生了多少废热,但我们知道它每秒需要17000升冷却水来维持正常运转。而为了发展百亿亿级超算,只能创造性地研发更加节能的微电子器件了。

自旋

提效节能方案可能从“超导自旋电子学”这一新领域中找到答案。顾名思义,这个新领域联姻了超导电子学与室温自旋电子学。“新郎”——超导电子学依赖铌(Nb)等材料的超导现象——一种零电阻

子自旋(及电荷)来存储和处理信息。电子的本征角动量——自旋,能向上(\uparrow)或向下(\downarrow)取向。这可赋予我们一种高效的方案来存储、处理及调控二进制0和1信息。其中一种方式是利用几个原子层厚的铁、钴、镍磁性薄膜来实现上述方案。人们可以利用自旋流来对上述磁性薄膜进行有趣的操作,如翻转其磁矩方向等。

自旋电子元件已不再是科幻的概念。它们早已应用于我们的电脑中,如由两层铁磁层夹着一层铜薄膜所组成的三明治结构早已应用于硬盘磁读头。两层磁性层中的一层用于极化电子,另一层用于探测其自旋取向。外部磁场可使两层磁性层平行或反平行取向,最终导致这些三明治结构处于低电阻或高电阻状态。该效应又名巨磁电阻效应(GMR),它的发现者 Albert Fert 和 Peter Grünberg 还荣获2007年的诺贝尔物理学奖。

无热耗的电流现象。如果超算完全由超导材料来建造,那功耗势必大幅降低。但很遗憾,我们还不知道如何设计和制造小至十几纳米的超导元器件来构造传统微电子电路。

而“新娘”——室温自旋电子学利用电

通过GMR磁敏传感器来感知硬盘微小区域的磁场进而读取其中的信息,别具匠心。但是为了产生GMR器件工作所需的自旋流,我们不得不向这些磁性超薄膜中注入一股损耗能量的电流。对于其他类似的自旋电子学应用,如利用自旋极化电流翻转磁矩,损耗的能量更多。故超导自旋电子学的优势所在是:结合超导电性的无热损耗特点及自旋电子器件丰富的功能,实现两者的强强联合。

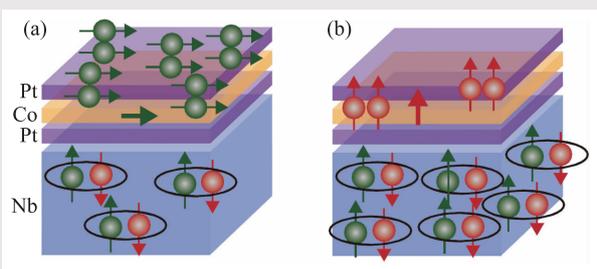


图1 超导自旋电子学的关键是利用自旋平行排列的奇异库珀对($\uparrow\uparrow$ 或 $\downarrow\downarrow$)而非反平行排列的正常库珀对($\uparrow\downarrow$ 或 $\downarrow\uparrow$)。研究者最近发现了一种简单的结构来产生这些奇异库珀对,它包括一层超导电的铌层(蓝)、超薄铂层(紫)、钴磁性层(黄)和另一顶部铂层。(a)如果施加外磁场使钴层磁矩方向位于面内(绿色箭头),这将有利于奇异库珀对的产生并减少铌中正常库珀对,导致超导转变温度降低。(b)若钴层磁矩方向垂直于膜面(红色箭头),将不利于奇异库珀对的产生,这将反过来增加正常库珀对的数量,使铌保持其本征的转变温度。因此只要奇异库珀对能在铁磁体中存在,它的自旋和超导电性就可以被同时利用

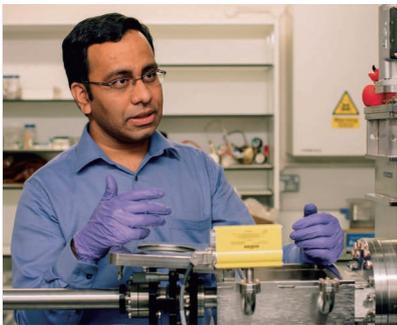


图2 拉夫堡大学的 Niladri Banerjee 希望超导自旋电子学可催生更加绿色节能的超级计算机

奇异库伯对

为了使超导自旋电子器件工作，你不能使用经典库伯对电子：对无损电荷输运起主要作用的载体。它是一对自旋方向相反的电子对($\uparrow\downarrow$ 或 $\downarrow\uparrow$)，因此净自旋为0，对自旋电子学毫无用处。然而，在2001年，三位来自德国波鸿Ruhr大学的理论物理学家 Sebastian Bergeret, Anatoly Volkov 和 Konstantin Efetov 预言了奇异的自旋极化库伯对的存在。它的奇异之处在于组成库伯对的电子其自旋方向相同($\uparrow\uparrow$ 或 $\downarrow\downarrow$)。只要这些库伯对能够在铁磁体中存在，我们就可能同时利用它们的自旋和超导电性。因此自旋极化库伯对将有望催生微小、几乎无损、功能极为丰富的信息处理器件。

然后，物理学家们花了近10年时间才真正证实了这些奇异库伯对的存在。2010年，来自剑桥大学的 Mark Blamire 及其同事和来自密歇根州立大学的 Norman Birge 研究组 (*Science* 329 59 和 *Phys. Rev. Lett.* 104 137002) 经过一系列实验终于取得了突破。困难在于产生这些自旋极化的库伯对实验上非常麻烦。它们仅存在于由超导层和两层正交磁化的铁磁层组成的人工薄膜结构的界面处。

然而，最近来自剑桥拉夫堡大学和挪威科技大学的研究人员(包括我)极大地简化了产生自旋极化库伯

对的材料结构，打开了超导自旋电子学的应用之门 (*Phys. Rev. B* 97 184521)。与其精妙地设计控制不同磁层的取向来侨联超导电性和自旋电子学，我们发现通过简便的单一磁层也能实现类似的效果。所使用的诀窍是“自旋—轨道耦合”，一种将电子自旋与电子绕核运动轨道联系起来的物理机制。

我们设计的结构包含一层典型的超导体例如铌薄膜、在其上沉积的单原子层铂薄膜、一层铁磁的钴薄膜和最顶层的另一层铂薄膜(如图1所示)。通过精细地选择铂层和钴层的厚度，我们追踪了其对钴层磁矩方向的影响。当钴层磁矩被外磁场完全拉到面内时，惊奇地发现铌薄膜的超导温度，相对于无外磁场的情形，显著地下降了。尽管知道外磁场本身也会降低超导温度，但是我们测到的降低程度远高于外磁场所导致的预期降低值。

接下来的两年，我们开展了各种实验来探究超导转变温度陡降的原因。原来它与正常库伯对的数量有关。如果磁矩躺在钴层面内，奇异库伯对将有幸存活，而这反过来将消耗正常库伯对，减少其数量，并导致转变温度的降低。但如果钴层的磁矩垂直于膜面，奇异库伯对将很难存在，这也意味着只有极少的正常库伯对会被消耗掉，从而增加了超导转变温度。

这项技术的关键在于，我们能够通过调控单一钴层的磁矩方向来控制铌层的超导电性，得益于铂层的自旋轨道作用。自旋轨道耦合作用使我们可以控制单层磁性薄膜的磁矩方向来控制奇异库伯对的数量。本质上，铂钴薄膜可视为一种自旋轨道耦合的磁体。它实现了超导电性和磁性的侨联，极大地简化了构造超导自旋电子器件所需的

材料结构。

感受绿色

自旋轨道耦合作用使构造全功能和实用的超导自旋电子器件简单很多，也让我们距离更高效的超算更近一步。然而，我们工作的意义远超实际应用。它向人们展示了三种扣人心弦的现象——超导、磁性、自旋轨道耦合可以共存于一体于铌钴铂体系。确实，当条件合适，全新的物态将涌现，包括我们这个例子中的磁性超导体(通常情况下，磁性将绞杀任何超导行为)。这些特殊物态不可能自然产生，只能存在于这些经过特殊设计的人工结构中。

对于现在的超导自旋电子学，可以类比19世纪中叶的电学。当时人们已经发现了电，但还没有发明灯。现在需要做的便是发明一种器件，它能充分发挥奇异库伯对的功能。一种可能性是构造超导版的自旋转移力矩(STT)器件——一种可利用自旋极化电流来实现磁矩翻转的经典自旋电子器件。

此类器件已用于自旋转移力矩型磁随机存储器(STT-MRAM)芯片。它们不仅便宜、节能、比传统存储器存储更多信息，还能让我们更精准地翻转存储单元的磁矩。而在传统场驱动的存储器中，利用外磁场进行写操作可能会扰乱临近存储单元的状态。

在STT-MRAM中，我们能够通过转移自旋极化电流携带的自旋角动量来翻转纳米磁体。而利用超导的自旋极化电流来构造STT器件，可能并不容易，但它将极大地提高能量效率。尽管现在还很难预测哪些信息技术将受到影响，我预期今日仅利用电荷的超算将来一定会被基于超导自旋电子学的超算所取代。绿色节能的超级计算机终将于那个时刻到来。