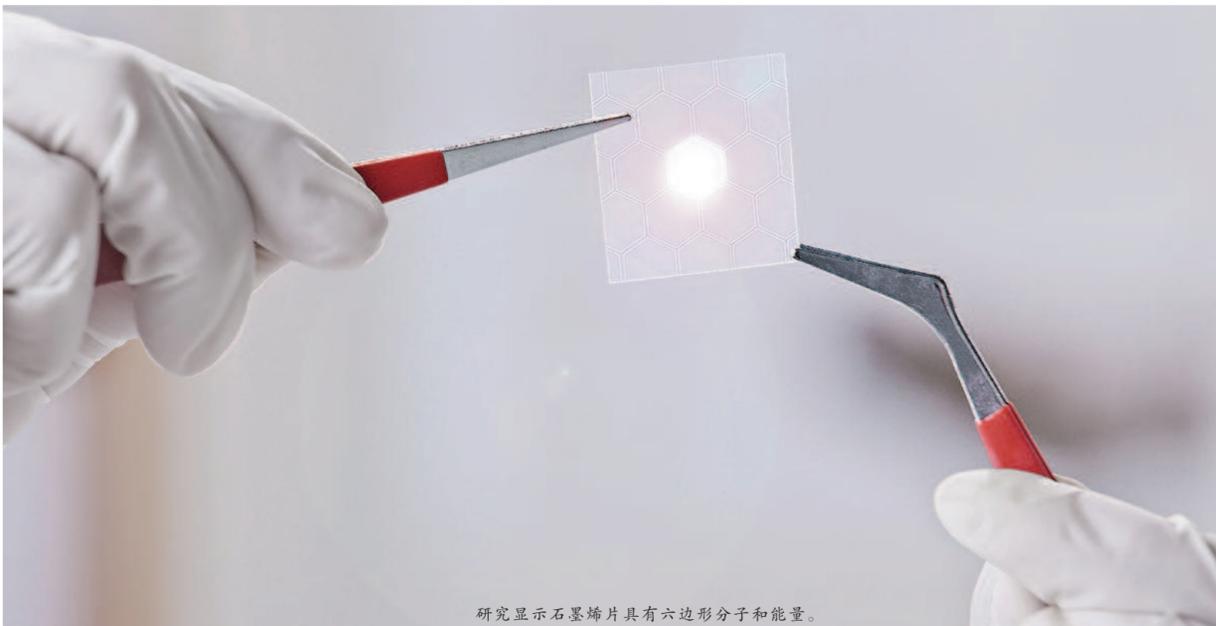


绝缘体、超导体、奇异量子效应……二维材料“流量明星”不断续写传奇

神奇“魔角”石墨烯推开全新材料物理学大门



研究显示石墨烯片具有六边形分子和能量。

自2010年获得诺贝尔物理学奖以来,石墨烯近年来成为二维材料的“流量明星”。今年前三个月,国际顶级学术期刊《自然》《科学》杂志已发表三篇关于石墨烯的报道。这些研究或为设计石墨烯基超导体奠定基础,或为探索石墨烯系统中的流体动力学开辟新路。

一直以来,石墨烯以应用前景广泛的电子特性而闻名。随着研究的不断深入,它的更多神奇性能有待人们去发现和探索。

■方陵生/编译

五年前,在美国洛杉矶会议中心举行的美国物理学会年会上,美国麻省理工学院的物理学家巴勃罗·贾里略·赫雷罗发布了一项重大成果。

此前,赫雷罗和他的同事一直在进行石墨烯的实验研究,石墨烯是从石墨(铅笔芯的

主要成分)上剥离下来只有单个原子厚度的碳薄片材料。然而,当赫雷罗将两个石墨烯薄片堆叠在一起,以一薄片相对于另一薄片旋转,形成某个神奇“魔角”时,一种神奇的效果产生了。

就是这个在石墨烯错位层中的意外发现,为科学家研究二维材料奇异物理学开辟了一个新的领域。

在那次美国物理学会年会上,赫雷罗展示了石墨烯的一种神奇新特性。他们将两层石墨烯堆以某个角度差异叠在一起,并通过门电压调控载流子浓度,成功实现了能带半满填充状态下的绝缘体,继而实现1.7K(开尔文)温度下的超导特性。

神奇“魔角”或让石墨烯成为电流几乎不流动的绝缘体,或成为超导体。这是一个具有重要意义的惊人发现,因为从量子计算到核聚变等多个前沿技术领域,超导体都有广泛的应用前景。

在这次年会之后,研究人员通过石墨烯叠层扭转产生“魔角”效应实验,发现了许多奇异的量子效应,例如显示磁阻特性的“准粒子”。美国哈佛大学的阿米尔·亚科比认为,这些奇异特性令人兴奋,蕴含着巨大的应用潜力。

更令人振奋的是,石墨烯的神奇才刚刚

崭露头角。新的研究发现,通过增加石墨烯薄片的层数,或以其他材料互换,也会产生类似效应。在探索石墨烯神奇特性的发现之旅中,科学家将深入研究隐藏在二维材料中不可思议的全新物理学。

石墨烯薄片叠层扭转后表现的种种神奇特性,为研究材料的基本特性,尤其是探索不同原子排列方式对材料特性所产生的作用,开辟了新的途径。

材料是否导电,取决于原子中的电子在原子核周围的排列模式。大致原理为,相邻原子的电子向外移动,形成一个互相重叠的“电子带”。在导电材料中,高能电子“电子带”拥有更多可容纳其他电子的空间,其本身

也有更多可移动空间,一旦施加电压,就可形成电流在电极之间流动。而在绝缘体材料中,高能电子带和低能电子带一样,都挤满了电子,在这样的材料中,电子就像挤在拥挤房间里的人群一样,几乎没有自由移动的余地。

石墨烯中的碳原子由蜂巢状六边形晶格互相连接,所以这种材料中的电子可以在晶格带中自由穿梭,这正是高速运行电子器件所需要的优良特性。

事实上,如果是蜂巢晶格结构没有任何瑕疵的天然石墨烯,从理论上来说,其电子可以光速移动,就像根本没有任何质量一样。但如果两层石墨烯薄片相叠,其中一层相对于另一层以某种角度扭曲,就可以改变

电子的移动方向。电子在两个六边形晶格中来回穿梭,形成“超晶格”,产生神奇的“莫尔效应”。

在石墨烯中,电子行为不光受碳原子晶格的影响,莫尔超晶格也会对电子在两层石墨烯之间的自由移动度产生影响。因此通过改变两层石墨烯薄片相叠的角度,可以大幅降低双层石墨烯薄片之间传导电子的速度,从而改变电子行为。

“如果拥有大量动能,如果电子移动速度很快,它们几乎没有时间产生相互作用。”赫雷罗说。但是,如果扭曲相叠的两层石墨烯薄片中的电子移动速度放缓,情况就不一样了。双层石墨烯薄片电子之间强大的相互作用意味着电子的相互运动变得更敏感,更加相互依赖。用技术术语来讲,它们之间的关系变得“高度相关”。而这也正是事情变得非常有趣的地方:电子活动方式的这种相关性的提高,可以产生原来根本不可能出现的奇迹。

以超导体为例,传统超导体中的电子互动导致它们组合成“库珀对”。量子力学定律限制了拥有相同属性(能量、位置等)电子的数量,但这并不适用于这种特殊的库珀对,它们可以聚集一起,在没有阻力的情况下,不受晶格原子的阻碍而四处移动。事实上,库珀对是高能准粒子的一个范例:许多电子呈聚集态四处移动,其表现像是一种新型粒子。

所以,如果想要寻找奇特的电子特性,让电子相关,二维材料是最好的选择。在三维空间里,电子通常有许多方式彼此远离,避免接触,但在二维空间里,特别是在石墨烯这样的薄层导体材料中,电子活动更趋向于聚合,从而显示出不同寻常的神奇特性。

某些特定运算。在一些需要用到强磁场的应用技术中,如核磁共振成像和核聚变反应堆等,也是超导体大显身手的领域。

产生磁场的方法之一是让电流绕线圈流动。对超导线圈加大电流强度可产生更强大的磁场。但是超导导线需要保持极低温度,处理难度很大。

这就解释了为何研究人员对“魔角”石墨烯的超导性能如此感兴趣,它可能为人们最终理解某些奇特超导现象提供新的途径。例如,某些被称为“层状铜氧化物”的铜基化合物可在相对较高(135K,相当于-138°C)的温度条件下产生超导性。40年前,这类超导体首次被报道后,其奇特的超导行为一直困扰着研究人员。

“对‘魔角’石墨烯的理解是否能帮助我们理解层状铜氧化物超导特性产生的原因,我们至今还不甚清楚。”赫雷罗说。他指出,层状铜氧化物和“魔角”石墨烯的相同之处是,它们都是叠层材料,且拥有一些相同的属性,但它们也有很多不同。赫雷罗直觉认为,这一研究对我们会有所帮助,但现在就下结论还为时尚早。

但麦克唐纳认为,这些能够实现摩尔效应的材料是哈伯德模型的完美映射。实验证明,改变施加在TMD双层材料样本上的电压,模型可以预测材料样本一系列行为变化,如铁磁性和反铁磁性之间的转换。随着磁性转换,原子旋转方向也会随之改变,不需要通过复杂的数学计算,通过实验也可得出模型预测结果。

麦克唐纳说,摩尔系统还将给我们带来多少惊喜,我们并没有完全的信心。但通过“魔角”石墨烯超导性理解的研究进展及预期,他表达了谨慎乐观的态度:“这些进展对于我们理解高温超导性具有重要意义。”

一些惊喜是我们可以期待的,赫雷罗最初在这些系统中发现超导性就是一个完全出乎意料的惊喜。尽管在之后几年里取得了持续进展,但赫雷罗认为,对于数百个有可能构建成功的摩尔系统中,科学家的认识还只限于表面。“这些都是非常复杂的系统,它们具有各自不同的组成部分、几何形状及复杂程度。”

科学家们在这一未知领域内已经迈出了令人振奋的第一步,未来有许多可能性正等待着人们去探索和发现。

石墨烯片。

本版图片除注明外均为视觉中国

“扭一扭”创造神奇材料特性

95后中国学者曹原在“魔角”石墨烯领域不断获得原创性突破,被誉为“石墨烯驾驭者”。图/nature.com



95后中国学者曹原在“魔角”石墨烯领域不断获得原创性突破,被誉为“石墨烯驾驭者”。图/nature.com

存在于二维空间的“调谐按钮”

美国新泽西州罗格斯大学的伊娃·安德烈伊和她的同事发现,当一层石墨烯薄片叠在另一石墨烯薄片上时,样本中的电子能量水平会出现一种被称为“魔角效应”的奇特变化,特别是当一层相对于另一层旋转约1°时,这种效应尤为明显。

其他一些研究团队也报告称发现了类似现象,理论物理学家对此很感兴趣,他们想知道,为什么会这样,究竟发生了什么。

美国德克萨斯大学奥斯汀分校的艾伦·麦克唐纳和同事对双层石墨烯的电子属性研究后发现,当两层薄片处于某个旋转角度时,电子的移动速度降为零。“电子活动完全停止了。”麦克唐纳说,“这对我们来说是个完全意想不到的惊喜。”

最大“神奇扭角”约为1.16°,但要深入研究石墨烯的种种神奇,这仍然太小,需要对旋转角度的方向进行极其精细的控制。赫雷罗认为,这种神奇扭角具有极大潜

力,有可能成为电子属性中前所未有的新“调谐按钮”,所以他决定试一下。

一开始,他的团队在扭曲双层石墨烯中发现,电子带的动能很小,正如麦克唐纳等人对电子低速移动的预测一样。于是,研究人员开始寻找一种被称为莫尔绝缘体的非导电态,他们认为这种状态可能存在于强相关电子中。后来,赫雷罗团队对这种电子行为进行观察后,发现了更有趣的现象。他们发现,对石墨烯施加电压进行微调,改变携带电流的电子数量,就可以产生超导体。与所有的超导体材料一样,这种情况只在低于1.7K的极低温度下才会出现。

“魔角”石墨烯的这种奇特电子效应引起了许多研究人员的兴趣,纷纷加入这一研究领域。激发他们兴趣的,不仅仅是发现新的基础物理学的前景,还因为超导体材料的广泛需求。比如,用于量子计算机中的量子比特,可通过量子物理学一些特殊定理加速

由不同材料制成的两层或更多层键合层,可产生多种不同的原子排列模式。例如,利用二硫化钨和二硒化钨原子间距4%的不匹配,可产生摩尔效应图案,图案以每8纳米的间隔重复出现。

TMD双层材料不依赖于“魔角”,对扭转角度的微小变化不敏感,实验的可重复性要高得多。美国康奈尔大学的研究人员与麦克唐纳等人合作,证明了一个由二硫化钨和二硒化钨构成的摩尔系统,用来探索各种相关电子行为,可作为最流行的“哈伯德模型”的物理模拟。

哈伯德模型于1963年由物理学家约翰·哈伯德提出,并以他的名字命名。哈伯德模型将电子能量分为两种:动能和相互作用产生的能量。哈伯德模型是研究莫尔绝缘体、超导体(特别是铜氧化物)和有序磁性的常用模型。尽管它的简单性令人沉醉,但在数学处理上却很困难,模型方程的精确解法仍然只存在于二维系统中。

哪些地方能用上石墨烯

电子材料领域

作为电极材料,石墨烯是绝佳的负极材料,被认为是可以替代硅的芯片材料。另外,石墨烯在柔性屏幕、可穿戴设备、太阳能充电等领域的应用也有待挖掘。

石墨烯在可穿戴设备领域具有一定应用空间。例如,爱尔兰科学家正在开发基于石墨烯的灵活可穿戴传感器,并发现该传感器能够检测到用户最细微的动作,包括跟踪呼吸和脉搏。另外,该传感器还能实现自供电。

散热材料领域

金属纳米石墨烯导热塑料如应用在LED灯具等产品的散热器上,其系统成本至少可降低30%。石墨烯所具有的快速导热与散热特性,使得石墨烯成为最佳的散热材料,可用于智能手机、平板电脑、大功率节能LED照明、卫星电路等。

汽车领域

石墨烯润滑油有自修复性能,能形成润滑保护膜,还具有抗磨性能和优异的成膜性能。它所独有的分水性能,可有效防止乳化。此外,它还具有很好的抗氧散热性,可有效延长机油使用周期。

石墨烯还可应用于动力电池负极复合材料,锂电池正极导电剂和功能涂层铝箔中,可极大减轻电池重量从而降低整车质量,延长电池使用寿命,大大提高电动汽车续航里程和充电速度。将石墨烯应用到热成像设备的芯片中,将可能使未来汽车有夜视功能。

生物医学领域

石墨烯具有突出的力学性能和生物相容性,将其作为增强填料可显著提高生物材料的力学性能。在基因测序技术领域,最近成功开发出来的DNA传感器,是一种以石墨烯为基础的场效应晶体管设备,能探测DNA链的旋转和位置结构。该传感器利用石墨烯的电学性质,成功实现检测DNA序列的微观功能。

(资料来源:中国热管理网)



耐高温实验中的石墨烯材料。