

通向石墨烯的随机行走

——诺贝尔奖得主海姆先生感人至深的 获奖演讲词(上)

薛加民 译

(上海科技大学 200031)

如果现在有人想要了解石墨烯美丽的物理内涵,他们可以从许多相关的学术综述,还有大众科学杂志上的文章中选择。在此我向读者推荐自己写的几篇相关的文章^{①-③},希望大家能原谅我的“自卖自夸”。为了不重复这些文章的内容,在这次演讲里,我决定给大家讲一讲我自己曲折的科研道路,以及这条路最终是如何通向诺贝尔奖的。这其中大部分的内容我从未在别的地方讲述过。当然,各位可以放心,我不会从我的幼儿园时代开始讲起。我将向您讲述我从1987年获得博士学位之后,直到2004年为我们赢得诺贝尔奖的文章被杂志接受这段时间内的故事。无疑,越接近尾声这个故事会变得越丰富。反观历史,我还会详细地描述2004年之前与石墨烯有关的研究工作,以及分析石墨烯为什么会引起这么多人的兴趣。我会努力让非物理专业的读者也觉得接下来的内容易懂而且有意义。

不要做已死的研究

我的博士论文题目叫做“*Investigation of mechanisms of transport relaxation in metals by a helicon resonance method*”。我只能说它是一个非常无趣的研究。在苏联的固体物理研究所,我花了五年时间,发表了五篇论文来完成这个学位。学术网站 *Web of Science* 很严肃地告诉我,我的这些文章被引用过两次,而且都是作者自己在引用。其实,在我的博士生岁月开始前十多年,这个研究方向就已经

没落了。即使如此,我还是从中学到了一些让我受益终身的东西,那就是绝对不要让你的学生研究那些已经死了很久的课题方向。

博士毕业以后,我在俄罗斯科学院下属的微电子技术研究所以找到了一份临时工作,做一名普通的研究员。苏联当时的研究系统允许甚至鼓励年轻的研究人员独立开展研究工作。经过一年的摸索,尝试不同的方向,我终于开始找到了合适自己的研究道路,从而与我的博士导师在学术上脱离了关系。以当时苏联极其困难的实验条件,我找到了一个可行而且新颖的实验方向,虽然这听起来是不太可能的事情。我用微细加工的装置制备了金属膜,在它上面沉积了一层薄薄的绝缘体,然后再沉积一层高温超导体。超导体的作用是通过迈斯纳效应把外加磁场约束到一个个涡旋里,对下面的金属膜产生高度不均匀的磁场分布。金属膜中的电子在这种空间上快速变化的磁场中(磁场在小于一个微米的范围内就会发生很大的变化)的运动在当时是一个新的研究领域,我发表了这个领域中的第一篇实验论文,之后西蒙(S. Bending)也独立地发表了类似的研究。这是一个有趣而且还比较重要的课题,在接下来的几年里我都在研究这个方向,包括1991年我在西蒙实验室做博士后的阶段。

这段经历给了我一个很重要的体会,那就是创立一个新的研究方向总是比在一个已经僧多粥少的领域里寻找新的突破要容易取得成果。当一个

全新的领域刚刚开始的时候,成功的几率会大得多。当然,很多关于这个新领域的美好预期可能最终无法实现,但是新的领域里做研究,总会有意想不到的现象产生。

别人的垃圾,我的金子

1990年,在我所在的研究所所长阿里斯托夫(V. Aristov)的帮助下,我得到了英国皇家学会一段为期6个月的访问机会。英国诺丁汉大学的劳伦斯(L. Evaes)和彼得(P. Main)邀请我访问他们的实验室。对于实验工作而言,6个月是非常短暂的。受这个条件所限,我只能研究这些实验室当时已有的一些样品。先前的实验人员留下了一些砷化镓微米线,它们已经被废弃在实验室的角落里好几年了。由于我曾经在资源稀缺的苏联学术界工作过,我能够在相对恶劣的环境中开辟出一条道路来。这些被别人视作毫无用处的样品成了我的金矿。我开始了每周100个小时的工作来研究它们。在这短短的6个月里,我做出了两个后来发表在 *Physical Review Letters* 上的工作。后来我常常用这段经历跟年轻的学生们开玩笑。当实验不像预期的那样进展顺利,他们开始抱怨样品不好导致发现不了新东西的时候,我就会跟他们说,“根本没有差的样品,只有差的学生/博士后”。仔细研究你总会发现一些新东西。当然最好还是投身新的研究领域,避免研究那些别人已经深入研究过的样品。但是,即使我们足够幸运,找到了一个像石墨烯一样激动人心的研究领域,谨慎研究和坚持不懈的精神会让人走得更远。

在诺丁汉的研究是如此的高强度和激动人心,我决定不回俄罗斯了。在苏联混乱的社会中求生对我来说无异于浪费生命。于是,在我33岁,学术h因子等于1的时候,我开始在欧洲寻找博士后的职位。接下来的四年我在不同的大学之间辗转,从英国的诺丁汉,到丹麦的哥本哈根,再到英国的巴斯,最后回到诺丁汉。每一份新的工作都教会我一两个新的研究领域,这段经历极大地扩展了我的科

学视野。在那些年,我的主要研究方向是介观物理,包括二维电子气体,量子点接触,共振隧穿,量子霍尔效应等等等等。我也熟悉了用分子束外延生长砷铝化镓异质结,提高了我在俄罗斯就开始学习的微细加工和电子束刻蚀的技术。所有的这些积累成为了十多年后石墨烯研究的坚实基础。

“温馨”的荷兰生活

到1994年时,我已经发表了足够多的优质的文章,参加了足够多的学术会议。我希望能够找到一个正式的学术工作。当我得到荷兰的奈梅根大学的一个副教授的职位时,我毫不犹豫地抓住了这个机会,结束了我“后苏联时代”各地流浪的生活。到了奈梅根的第一个任务无疑是树立起自己的学术地位。但是当时我没有任何的启动经费,也没有微细加工的设备来继续我以前的研究工作。我拥有的是奈梅根强磁场实验室里的强磁场装置,低温以及电子设备。当时强磁场实验室的主任是简(J. Maan)。他也是我的“老板”,掌管了所有的实验经费。虽然当时我作为独立研究员拿到了研究经费,但是我不能随我的心愿来支配这些钱。钱都是通过由正教授领导的所谓“工作组”来分配的。另外,荷兰的博士研究生只能由正教授指导,副教授只能靠自己单打独斗。虽然这听起来有些怪诞,但是这就是90年代荷兰的研究体制。这样的研究条件对我来说非常艰难。开始的一两年,我挣扎着适应这种系统,它与我在诺丁汉所经历的愉快而富有成效的研究岁月形成巨大的反差。而且令人奇怪的是,只是在大学里有如此森严的等级制度,走出大学围墙,每个人对我都很好,包括强磁场实验室的主任简和其他研究人员。

即便如此,在奈梅根的研究机会还是要比在俄罗斯好得多。最终依靠我的海外合作者的帮助,我还是在荷兰的学术圈里立住了脚。诺丁汉的同事们(尤其是穆罕默德(M. Henini))生长了二维电子气体的晶体,之后它们被送到俄罗斯,我从80年代就开始的同事和好友杜波诺(S. Dubono)把它们微细

加工成我需要的器件。我当时的研究课题可以被称作“介观超导”。杜波诺和我用二维电子气体加工出微米尺寸的霍尔器件,然后用它来探测很小的超导体周围的局部磁场。这种方法不仅可以测量到单个磁场涡旋进入和离开超导体,还能测量许多其他非常微弱的变化。依靠弹道输运下的霍尔微磁测量技术,我们发展了这种新的实验方向。在接下来的几年里,我们在这个领域充分地展开研究,最终在 *Nature*, *Physical Review Letters* 等刊物上发表关于顺磁迈斯纳效应,具有分数个磁通量子的涡旋,在约束空间中的磁场涡旋分布等的研究成果。我的妻子格里戈里耶娃(I. Grigorieva)是磁场涡旋方面的专家。她在荷兰找不到工作,所以她有足够的空闲时间来帮助我的研究和撰写论文。而杜波诺不仅仅帮我加工器件,同时也常常来到奈梅根来帮我实验测量。我们形成了一种非常高效的合作模式,他负责采集数据,我则在旁边房间里的电脑上分析数据,决定实验的下一步。

磁悬浮的魅力

关于介观超导研究的第一个结果大概在 1996 年的时候开始成形,这让我们在荷兰的研究系统里找到了一丝安全感,同时我也开始扩展我的研究方向。我广泛地调研,试图找到新的研究方向。在奈梅根最主要的实验优势是强大的电磁铁,但是同时它们也是让我头痛的地方。虽然这些磁铁能够产生 20 特斯拉的磁场,比我们的很多竞争者所拥有的超导磁场要稍微强一点(那些超导磁场大约为 16 到 18 特斯拉),但是这些庞然大物运转起来极其耗电,我们只能每天晚上当电价便宜的时候用几个小时。我当时在介观超导方面的研究仅仅需要非常微弱的磁场(小于 0.01 特斯拉),所以我用不到这些电磁铁。这让我这个强磁场实验室的研究员感到一些愧疚,我感到有责任找到一些可以利用到这些强大的电磁铁的研究课题来。我意识到相比其他的超导磁铁,这些电磁铁的唯一明显优势就是它可以在室温下工作,不需要像其他超导磁铁一样冷却

到液氮的温度。然而,这在一般人看来并不是什么优势,因为大部分的凝聚态实验都需要极低温的环境。这使得我和同事们开始思考什么强磁场下的现象可以在室温里研究。不幸的是,我们似乎根本没有选择。

终于,我无意中了解到了一个所谓“磁化水”的现象。据称,把一块永久磁铁放在热水龙头上可以防止水垢在水管里的形成。或者把一块磁铁放在水龙头上,你的水壶里将不会形成一层厚厚的沉积物。这些磁铁随处可见,很容易买到。网络上有数以百计的文章介绍这种现象,但是其背后的物理原理却不明了,甚至还有很多研究人员根本不相信这种现象的存在。在过去的 15 年里,我曾尝试过几次要研究这种“磁化水”现象,都无果而终,我至今也不能给出一个解释。但是,当时实验室里室温下的强磁场让我横向联想到了磁化水的实验。我想,如果磁化水效应真的存在,那么 20 特斯拉的强磁场应该产生比 0.1 特斯拉的普通永久磁铁明显得多的效应。

有了这个想法,在某一个星期五的晚上,我把一点水倒进了我们实验室正在产生巨大磁场的仪器里。往实验仪器里泼水很显然不是一个正规的实验操作,现在我也记不起来当时我为什么会干出如此“不专业”的事情来。很显然,没有人曾经尝试过做这样傻的事情,虽然这种类似的仪器在世界上几个实验室里已经存在了几十年了。让我极为惊讶的是,水并没有从强磁铁中流出来,而是滞留在了磁铁的中心。来自诺丁汉的访问学生温欠托(H. Carmona)和我玩了一个多小时,我们用一根木棍搅动滞留在磁铁中心的水,并改变磁场的强度,最终,我们看到了如图 1 所示的惊人现象,一个水球悬浮在了空中! 这太神奇了! 我们很快意识到这个现象背后的物理是我们熟悉的逆磁性。但是我花了很长时间才让我相信水的这么微弱的逆磁效应(在外加磁场强度为 B 的时候,水能产生 $0.00001B$ 的磁场来抵抗它),比铁的磁性要弱十亿倍,居然可以抵抗水的重力。我的许多同事,包括那些一辈子与强

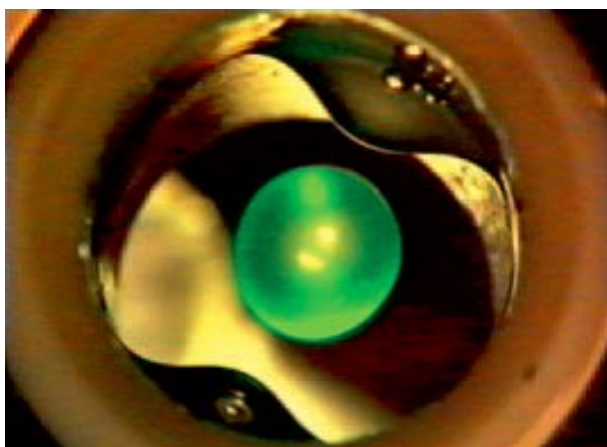


图1 在奈梅根的悬浮时刻。左图:直径大约5厘米的水球自由地悬浮在磁铁中心。右图:学会了飞翔的青蛙。这张图片标志着“非磁性”物质,包括人的磁性并非可以忽略。这个实验为著名理论物理学家贝里(M. Berry)和我赢得了2001年的搞笑诺贝尔奖。起初,颁奖方询问我们是否有胆量来接受这个奖,我们答应了。我为我们的幽默感和自嘲的勇气而感到骄傲

磁场打交道的研究员,看到这个现象时都目瞪口呆,甚至还有一些人认为这是一个恶作剧。

接下来的几个月,我都在给我的同事们和访问者演示这个实验,同时设法为这个美丽的现象找到一个更为吸引普通大众的演示方式。在我们尝试过悬浮的众多物体中,图1的悬浮青蛙引起了媒体的广泛关注。更重要的是,在热闹的媒体报道背后,这张图片甚至进入了许多物理教科书。虽然它有些怪诞,但是这个实验让人们重新审视逆磁效应,我们不再认为它是一种微不足道的性质了。有时候我出去参加学术会议的时候,会有人拦住我说:“我认识你!不过抱歉不是因为石墨烯,而是因为我在物理课上展示过你的悬浮青蛙。学生们总是很好奇这只青蛙为什么能飞翔。”有关这只青蛙的故事,以及有关逆磁悬浮的稳定性的深邃物理学,大家可以参考我在 *Physics Today* 上写的一篇文章。

星期五晚的实验

磁悬浮的实验是如此的有趣,甚至让人上了瘾。它给我上了重要的一课,那就是尝试那些和我的专业领域八竿子打不着的研究方向有可能会产

生非常有趣的结果,即使最初的想法可能是极其简单的。这段经历影响了我的研究风格。从那以后,我开始做一些不合常规的实验尝试,并且无端地称它们为“星期五晚的实验”。当然这个名字并不准确,因为没有什么深入的研究工作可以在一个晚上完成。实际上,它需要好几个月的横向思考,毫无明确目的地查阅不相关的文献。最终,你会找到一种感觉——注意是感觉而不是想法——你会感觉到什么问题研究一下可能会很有趣。接着,你开始尝试实验。通常的结果是失败。然后你有可能继续试一试或者放弃。不管怎样,在某个时刻你都必须做出一个艰难的决定,究竟是继续投入精力,还是放弃尝试,开始研究别的问题。所有的这些都是在你的主要研究活动之余进行的,它们只需要占用你的一点点时间和一点点思考。

从我在奈梅根工作的时候开始,我就用这种横向思考来设计本科生和研究生的课题了。学生们对于这种研究方式总是感到很兴奋。1999年到奈梅根来读博士学位的诺沃肖洛夫(K. Novoselov)(译者注:诺沃肖洛夫与海姆分享了2010年诺贝尔奖)参与了很多这样的实验。为了不影响学生的正常学习和毕业,这些研究通常耗时不会超过几个月。虽然随着每一次的失败渐成事实,起初的热情

都会慢慢消退,但是有一些学生后来告诉我说这些广泛探索的研究经历是他们人生中的无价之宝。

最令人惊奇的是,有的时候失败并未如期而至。壁虎胶带(Gecko tape)就是这样的例子。一个偶然的机,我读到一篇文章描述了壁虎超强的攀爬能力背后的原理。其中的物理是很简单的。壁虎的脚趾上覆盖着许多微细的绒毛,每一根绒毛能够和它要攀爬的表面产生微弱的范德瓦尔斯力(10^{-9} 牛顿量级),但是亿万根这样的绒毛就足以产生巨大的吸引力,从而可以使得壁虎爬上任何物体表面,甚至玻璃的天花板。尤其引起我注意的是这种绒毛的尺寸,它们在微米量级,这正是我所研究的介观物理所在的尺度范围。当这个现象在我的脑海里时隐时现了一年多之后,杜波诺斯(S. Dubonos)和我设计出了一种能够模拟壁虎脚趾上绒毛的材料。杜波诺斯加工出了大概一平方厘米大小的这种材料,它表现出了比较明显的黏附力。不幸的是,这种人造的材料比不上壁虎的脚趾,经过几次粘贴和分离之后,它的黏附力就完全消失了。但是,这仍不失为一个重要的验证性实验,它启发了其他人在这个领域中的深入研究。我们希望某一天人们能够复制出像壁虎脚趾那样的结构和具有自我清洁功能的胶带。这样这项研究就可以转化成产品了。

错误的尝试胜于无聊

在我准备这个演讲的时候,我总结了一个我们曾经尝试过的“星期五晚实验”的列表。直到那个时候我才意识到一个令人惊讶的事实。在大约15年的时间里我们一共做了2,30个这样的实验,可以想见,大部分的都彻底失败了。但是有三个成功者:磁悬浮,壁虎胶带以及石墨烯。这意味着一个极高的成功率:超过了10%!除此之外,还有几次与成功擦肩而过。比如,我曾读到一篇文章关于FeGeSeAs合金中的巨逆磁效应,这意味着这种材料可能会出现高温超导状态。我找同事拉马什(La-

marches要了这种样品,诺沃肖洛夫和我用弹道输运霍尔磁测量技术来检验这种巨逆磁效应,但是失败了。即使冷却到1K也没有发现这种巨逆磁效应。这次尝试发生在2003年,远早于后来引发巨大关注的铁基超导体的发现。至今我还在寻思当时我们的样品中是否有很小的一部分转变成了超导体,只不过被我们忽略了。另外一次这样的错失良机是我们试图测量单个活体细胞的“心跳”。实验的想法是用二维电子气体的霍尔器件来作为高精度的电压计,用以测量活体细胞中的生物电信号。我们实验的结果是,当细胞活着的时候我们的装置测量不到任何“心跳”,但是当我们用大量酒精导致细胞凋亡的时候,我们可以观察到巨大的电压脉冲。现在我明白了当时之所以探测不到活体细胞的心跳是因为我们选错了细胞。我们选的是酵母菌,这是一种比较木讷的细胞。在我们的实验之后过了四年,其他的研究组选用胚胎心脏细胞在石墨烯上取得了成功。

老实说,我并不认为如此高的成功率是因为我特别擅长于的横向思考。更确切地说是,它告诉我们,试探(有的时候甚至是漫无目标的试探)新的研究方向比一般人预期的回报率要高。我们很可能在某一个已有的矿藏里挖掘得太深了,留下了大量未被探寻过的宝藏就埋藏在浅浅的地表下,只要稍微往旁边一试探我们就会发现它。当一个人有尝试的勇气时,虽然并不是一定总是有所回报,但是至少这是一次探险的经历。

曼彻斯特的生活

到2000年,我的名下有了介观超导和磁悬浮的研究工作以及四篇发表在*Nature*上的论文,申请正教授的条件成熟了。当我的同事们得知我最终选择了曼彻斯特大学而拒绝了其他一些看起来更加著名的大学时都感到非常惊讶。其实其中的原因很简单。曼彻斯特大学教授招聘委员会的主任穆尔(M. Moore)知道我的妻子并不仅仅是我的实验助

手和奈梅根的兼职物理教员,他还知道她曾经在布里斯托大学的博士后期间做得非常成功。所以他建议我妻子申请曼彻斯特大学的一个教职。在荷兰的六年里,我从没有奢望过我们夫妻可以在同一个学校都有正式的职位。这就是让我们决定去曼彻斯特大学的原因。我们不仅感激这个可以同时解决我们两人工作问题的机会,而且也为未来的同事对我们的关心而感动。我们从来没有后悔过做出这个决定。

于是,2001年初,在曼彻斯特大学我分到了几间年久失修,装满老仪器的房子,还有10万英镑的启动经费。大学里没有共享的大型实验平台,除了一台氦气液化机。这对我来说不成问题。我继续在奈梅根时的工作模式,借助别的合作者,尤其是杜波诺斯的帮助来开展工作。实验室以令人惊讶的速度成形了。半年之内,我拿到了我的第一笔50万英镑的研究经费。我用它买了一些必须的装备。虽然我们一岁的女儿占据了妻子很多时间和精力,她也在几个月后申请到了她的启动经费。我们邀请诺沃肖洛夫以研究人员的身份加入我们的实验室(同时他还是作为研究生挂靠在奈梅根在2004年他从奈梅根获得博士学位)。我们实验室的研究开始产生成果,这为我们赢得更多的资助,从而导致更多的成果。

到2003年,我们已经发表了几篇优质的论文,包括在*Nature*, *Nature Materials* 和 *Physical Review Letters* 上,同时我们也不断地为实验室增添新的仪器。另外,我们拿到了一个一百四十万英镑的资助(由时任科技部长的赛恩斯伯里(D. Sainsbury)倡导的研究基础设施计划提供),计算机系的伊尔(E. Hill)和我建立起了曼彻斯特介观和纳米技术中心。我们并没有用这笔意外之财来建房子,相反,我们利用了计算机系已有的一个250平米的超净间。我们搬走里面一些老旧的仪器,取而代之的是一些最先进的微细加工设备,包括一台新的电子束刻蚀系统。对于这个中心,伊尔和我最感到骄傲的

是世界上许多其他类似的中心拥有更为昂贵的仪器,但是我们的中心从2003年起,就持续产出新的器件结构。我们拥有的并不是一匹用来展示的骏马,而是一匹埋头苦干的驮马。

每当我向其他国家的同事描述我的这段经历时,他们都觉得在三年之内,凭借并非天文数字的启动经费就可以建立起一个完整的实验室和微细加工中心实在是难以置信。如果我不是亲历者我也不会相信。一切进展的都非常顺利。大学很支持我们的工作,但是我最要感谢的是英国工程和物理科学研究委员会(EPSC)非常负责的工作模式。这个资助机构民主而且不排外,你在学术界的地位以及人脉关系基本上不会产生任何影响。另外,在同行评议的过程中,也不会要求你的研究项目要有所谓的“前瞻性的想法”和“对社会与经济需求的巨大应用前景”。事实上,这个机构是基于申请者最近一段时间在其领域的研究成果而分配经费的。那些工作得勤奋而且有效的研究者一般会获得资助。当然,没有哪一个资金分配体系是完美的。我们总在期望更好的体系。但是,让我改用丘吉尔的一句名言,“除了我所知道的世界上的国家以外,英国的研究资助体系是最糟糕的”。

三朵思想的云

当我们的实验室和纳米中心慢慢成形的時候,我开始有一些空闲的时间来考虑新的“星期五晚实验”。壁虎胶带的成功和那几个关于酵母菌和“准铁基超导体”的失败就是发生在那段时间。一位来自俄罗斯研究所的高级研究员,我们实验室的常客以及宝贵的合作者,莫洛佐夫(S. Morozov),把他的前两次访问浪费在了研究“磁化水”的课题上。2002年秋,我迎来了我们在曼彻斯特的第一位研究生,姜达(Da Jiang)。我需要给他设计一个博士课题。显然,在开始的几个月里,他要花时间提高英语,熟悉实验室的环境。对于一个初学者,我建议了一个我横向思考的课题,那就是把石墨加工

成尽可能薄的薄膜,如果做成了,我答应他我们将测量它的“介观”性质。近来,当我试图回想起当时这个想法是怎么产生的时,我记得有三朵非常不成形的“思想的云朵”。

第一朵云是所谓“金属电子学”的概念。如果给金属一个外加电场,金属表面的电子数目会改变,从而可以预见它的表面性质也会改变。这正是现代半导体电子器件工作的原理。为什么不用金属代替半导体硅呢?当我还是本科生的时候,我尝试过给金属加电场,用X射线来探测金属表面晶格常数的变化。这个想法是很天真的,因为通过简单的数量级估计我们就能知道这种变化是极其微小的。没有哪一种电介质可以承受高于 $1\text{V}/\text{nm}$ 的电场强度,如果换算成电荷密度的话,相当金属表面电荷密度的改变不能超过每平方厘米 10 的 14 次方个电子(译者注:我用高斯定理计算了一下,似乎应为每平方厘米 10 的 13 次方个电子)。作为比较,一个普通的金属,比如金,在中性状态下每立方厘米包含有大约 10 的 23 次方个电子。即使对于一个纳米厚的金薄膜,在其上增加或减少每平方厘米 10 的 14 次方个电子只能改变其电子密度的 1% ,从而电导率改变 1% (译者注:我检查了一下,似乎应为千分之一或者万分之一),更不用说其晶格常数更为微小的变化了。

历史上曾有许多研究人员试图测量这种电场对于金属的作用。最早这个想法要追溯到 1902 年,在电子刚刚被发现之后,汤姆孙(J. Thomson)(电子发现者, 1906 年诺贝尔物理学奖得主)就曾建议查尔斯·莫特(Charles Mott)(著名理论物理学家尼维洛·莫特(Nevill Mott)之父,尼维洛·莫特获得 1977 年诺贝尔奖)去寻找金属薄膜中的电场效应,但是没有找到。科学文献中最早关于金属中的电场效应的记载出现在 1906 年。如果不用普通的金属,我们也可以考虑采用电子密度低得多的半金属,比如铋,石墨或者锑(译者注:有趣的是,这三者为逆磁性最强的三种材料,除了超导体以外)。在过去的

一个世纪里,人们尝试过探寻铋薄膜中(电子密度为 10 的 18 次方每立方厘米)的电场效应,但是只观察到了它随着外加电场非常微弱的电导变化。因为对这个研究方向有所了解,加之有生长砷铝化镓异质结的经验,我时不时会思考一下用别的材料来做探寻这种效应,尤其是用超薄的超导体,当它在普通导体/超导体转变临界点时,它的电场效应会被放大。在奈梅根,我还曾一度被分子束外延的方法在砷铝化镓表面生长的铝薄膜点燃热情,但是经过一些数量级的估计之后,我觉得成功的几率太小,根本不值一试。

在 1990 年到 2000 年左右,碳纳米管是另外一朵悬挂在我脑海中的云。那一段时间是碳纳米管的研究最为热门的时候。当时在荷兰,我有机会参加了德克尔(C. Dekker)和柯文采(L. Kouwenhoven)的报告,也读过埃布森(T. Ebbesen),麦克尤恩(P. McEuen),饭岛澄男(S. Iijima),阿沃斯(P. Avouris)等人的论文(译者注:此几位皆为碳纳米管方面最为著名的大人物)。他们所展示的那些非常漂亮的研究成果每每都吸引我想进入这个研究领域。但是当时进入已经太迟了,我想找到别的研究方向,避开那拥挤的碳纳米管研究大军。

第三朵云是我读到一篇德雷斯尔豪斯(M. Dresselhaus)写的关于在石墨的层与层之间插入其他物质的综述性文章。文中清楚地指出,即使经过多年的研究,我们对石墨依然知之甚少,尤其是其电子学性质。这篇影响深远的文章促使我深入地调研了石墨方面的文献。我读到了伊斯昆纳泽(P. Esquinazi)和科普洛维奇(Y. Kopelevich)的文章,他们报导了铁磁性,超导性和金属-绝缘体转变,这些都发生在我们的老朋友石墨身上,而且是在室温下。那些撩人心弦的文章给我留下了深刻的印象,我感觉到石墨非常值得深入研究一下。

这三朵思想的云(或许还有其他我无法回想起来的因素)通过某种莫名的方式融合在了一起,形成了我给姜达的研究课题。我估摸着如果我们能

成功地做成石墨薄膜,而不是铋薄膜,那么它们有可能展现一些类似于碳纳米管的有趣电子学性质。为什么不在这个方向试探几个月呢?我想。

① A. K. Geim, K. S. Novoselov. *Nature Mater.* 6, 183 (2007).

② A. K. Geim, P. Kim. *Sci. Am.* 298, 90 (2008).

③ A. K. Geim. *Science* 324, 1530 (2009).

(本文是2010年诺贝尔物理学奖得主之一海姆(Andrea Geim)的获奖报告,原文请参见诺贝尔奖官方网站(http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/geim_lecture.pdf))。



科苑快讯

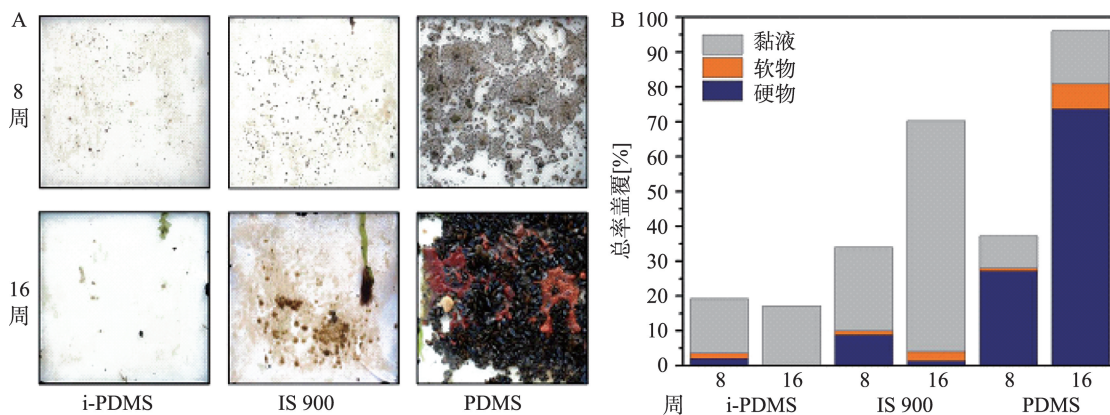
防止超黏海洋生物附着的新聚合物

太多的贻贝会造成非常棘手的问题,这些双壳类软体动物利用各种机会将自己黏附到水下物体上面。他们会阻塞管道,破坏科研设备,损毁大坝和船舶。现在,科学家已经找到了解决办法。研究者在《科学》(*Science*)期刊上报告,他们开发了一种聚合物润滑剂,可以防止贻贝附着在水下物体的表面。贻贝附着所用的核心武器是足丝(byssal thread),一旦它发现固体结构,就会分泌这种粘性纤维。为了让新型润滑剂有效对抗这种有机物,所以科学家模拟使贻贝难以注意到自己身下的表面而附着。在测试中,翡翠贻贝(又称亚洲绿贻贝,

Perna viridis)向表面伸出粘性附体,却无法附着。

在马萨诸塞州斯基尤特镇(Scituate),经过8个星期的水下浸泡,涂过抗贻贝附着聚合物的盘子上附着的贻贝密度平均为每平方厘米4个,而没涂过这种聚合物的盘子的贻贝密度达每平方厘米118个。这种抗贻贝材料在上市之前,还须继续测试。不过对科学家和海员们来说,它可能会成为摆脱贻贝困扰的救星。

(高凌云编译自2017年8月17日 www.sciencemag.org)



不同材料的防粘连效果图示:A. 静置8周和16周后,每种表面类型相关污染群体的代表性图像;B. 污染区域的覆盖面和组成