

# 石墨烯：丰富多彩的完美二维晶体

——2010 年度诺贝尔物理学奖评述

任文才<sup>†</sup> 成会明<sup>††</sup>

(中国科学院金属研究所 沈阳 110016)

2010 年 10 月 5 日,瑞典皇家科学院在斯德哥尔摩宣布,将本年度的诺贝尔物理学奖授予英国曼彻斯特大学的安德烈·盖姆(Andre Geim)和康斯坦汀·诺沃肖洛夫(Konstantin Novoselov)(见图 1),以表彰他们在二维材料石墨烯方面的开创性实验研究。

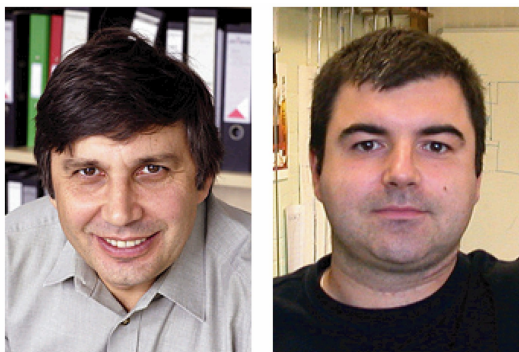


图 1 安德烈·盖姆(左)和康斯坦汀·诺沃肖洛夫(右)

安德烈·盖姆,1958 年出生于前苏联,1982 年在莫斯科物理技术大学获硕士学位,1987 年在俄罗斯科学院固体物理研究所获得博士学位,现为曼彻斯特介观科学与纳米技术中心主任、曼彻斯特大学物理系 Langworthy 教授和皇家学会 2010 年 Anniversary 研究教授。

康斯坦汀·诺沃肖洛夫,1974 年出生于前苏联,2004 年在荷兰内梅亨大学获博士学位,现为英国曼彻斯特大学教授和皇家学会研究员。

## 1 从搞笑诺贝尔奖到诺贝尔奖:天马行空的研究方式

安德烈·盖姆不是一个传统意义上的科学家,更像是一个发明家,他以其异乎寻常的甚至有些出格的想法和放牧式的研究方式而闻名于物理学界。他有着发现新的、有兴趣的研究领域的诀窍和敏锐

洞察力,从飞行的青蛙、壁虎胶带到石墨烯,他总能做出一些可以吸引公众视线和激发人们想象力的研究。“安德烈·盖姆实验室的风格是拿出 10% 的时间来做一些所谓的‘Friday evening(周五晚间)’实验。我们只是做各种各样疯狂的、很可能没有任何结果的事情。那些古怪的想法大多数时候不可行,但是一旦可行其结果真的令人吃惊”,康斯坦汀·诺沃肖洛夫这样回忆道<sup>[1]</sup>。安德烈·盖姆喜欢“hit and run(打了就跑)”的研究方式,自从博士后开始,他大约每隔 5 年便更换一个新的研究方向,他不喜欢把同一件事情从摇篮一直做到坟墓的研究方式。有时,他半开玩笑地说,他对做“Re-search(研究,又可以拆字为‘再探求’)”不感兴趣,只对“Search(探求)”感兴趣<sup>[2]</sup>。

“飞行的青蛙”就是他在寻找新事物的时候出现的<sup>[3]</sup>。安德烈·盖姆一直对于水的磁性以及用磁场软化水的想法非常感兴趣。当他把水放到一个强的超导磁场中时,惊奇地发现水可以被悬浮起来。于是他决定找一个更加有趣的方式来演示该发现。既然水可以被悬浮,那么一个大部分由水组成的生物体也应该能被悬浮起来,这就是那个著名的“飞行的青蛙”实验。那个飞行的青蛙已经飞遍了全世界,不仅引起了公众的想象,并且也鼓舞和激发了其他研究者对磁悬浮的研究兴趣。正是由于该项研究,安德烈·盖姆与 Berry 相的发现者 Michael Berry 分享了 2000 年度的搞笑诺贝尔奖。

2001 年,安德烈·盖姆从荷兰内梅亨大学转到英国曼彻斯特大学,这也正是他开始新的研究方向的一个好时机。他开展了石墨烯<sup>[4]</sup>、壁虎胶带<sup>[5]</sup>和磁畴壁<sup>[6]</sup>的研究,其中石墨烯是其最重要的发现。安德烈·盖姆通常基于自己的知识和设备来寻找未被探

2010-11-30 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email: wrcen@imr.ac.cn

<sup>††</sup> Email: Cheng@imr.ac.cn

索的新的研究领域,他称之为“积木学说”<sup>[2]</sup>. 石墨烯的发现正是基于这个“积木学说”. 曼彻斯特大学研究纳米材料的设备以及安德烈·盖姆在博士后期间积累的有关低维系统方面的知识为石墨烯的发现奠定了基础. 石墨烯的研究也是从 Friday evening 实验开始的,当时他并没有抱太大的期望<sup>[1]</sup>. 如果把碳纳米管展开成一层单原子厚的材料将会发生什么? 这是安德烈·盖姆最初的想法,做类似于碳纳米管的材料,但是从石墨入手<sup>[2]</sup>. 这项研究开始于 2002 到 2003 年期间. 那时没有人想到会得到单层石墨, 10 层或者 100 层的石墨看起来似乎才是合理的. 最初安德烈·盖姆与康斯坦汀·诺沃肖洛夫试图使用抛光机将石墨减薄,但最终以失败告终.

利用透明胶带剥离石墨获得新鲜、干净的石墨表面是 STM(扫描隧道显微镜)研究中的一个标准技术.“我们以前就知道这种方法,但万物逢时皆美好”,康斯坦汀·诺沃肖洛夫后来回忆说,“那时当想到这种方法的时候,我们便知道这就是我们所要找寻的”<sup>[1]</sup>. 经过几星期的尝试,他们便制备出了石墨烯.“这不是我们唯一幸运的事情. 只有单原子厚度的石墨烯很难被观察到,只能在非常特别的基底上才可以看到. 当时我们并不知道,但是非常巧合,我们正好有这种基底,并且也正是我们所使用的,完全是运气”<sup>[1]</sup>. 后来经过近一年的研究,他们又制备出了单层石墨烯和单层氮化硼、单层二硫化钼等一系列的二维晶体<sup>[7,8]</sup>. 安德烈·盖姆回忆说:“我们当时并没有期望可以把石墨剥离到单原子厚. 因为晶格中原子的振动非常剧烈,理论上也认为二维材料不可能稳定存在”<sup>[2]</sup>.

安德烈·盖姆天马行空的研究方式和“积木学说”的研究策略导致了石墨烯的发现,引发了凝聚态物理和材料科学领域的又一研究前沿.

## 2 从理论到实验:石墨烯的探索

碳是元素周期表中最神奇的元素,是 DNA 和地球上所有生命的基础元素. 它可以以多种不同的形式存在:三维石墨、亚稳态的金刚石、零维的富勒烯和一维的碳纳米管<sup>[9]</sup>. 石墨烯是由单层碳原子构成的二维蜂窝状结构,是构成其他维数形式碳材料的基本单元(见图 2). 石墨烯的理论研究可追溯到上世纪 40 年代. 1947 年 P. R. Wallace 首次计算了石墨烯的电子结构,并且发现其具有奇特的线性色散关系<sup>[10]</sup>. 自此,石墨烯作为理论模型,被广泛用于

描述碳材料的物理性能. 1956 年, J. W. McClure 导出了石墨烯的波函数方程<sup>[11]</sup>, 1984 年, Semenoff, DiVincenzo, Mele 等讨论了其与狄拉克方程的相似性<sup>[12,13]</sup>.

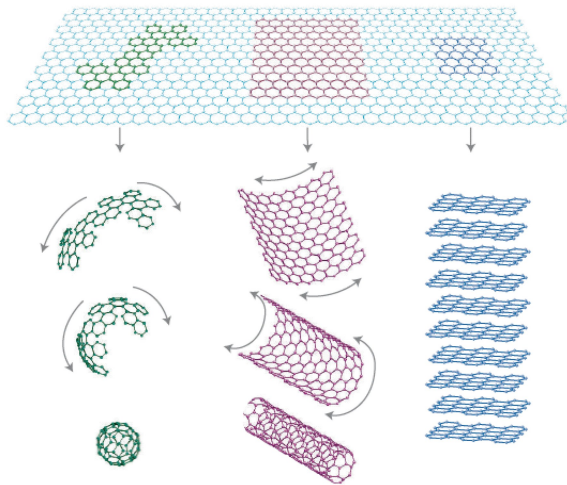


图 2 石墨烯及其构建的零维富勒烯、一维碳纳米管和三维石墨<sup>[9]</sup>

石墨烯的实验研究可以追溯到 1962 年,德国化学家 Hanns-Peter Boehm 将氧化石墨剥离、还原,然后在透射电子显微镜下观察到了原子厚度的石墨碎片<sup>[14]</sup>. 从上世纪 70 年代起,材料科学家开始在镍单晶以及碳化硅等表面生长石墨烯和超薄石墨薄膜<sup>[15,16]</sup>. 1994 年, Boehm 等在国际理论和应用化学联合会的报告中正式给出了石墨烯的定义,自此石墨烯才作为专门术语出现在文献中<sup>[17]</sup>. 上世纪 90 年代,一些科学家开始探索如何从石墨来分离石墨烯. 1999 年,当时任职于华盛顿大学的 Ruoff 和 Lu 利用将石墨表面与硅基体摩擦的方法制备出了多层石墨薄片<sup>[18]</sup>.

正如诺贝尔物理学奖评选委员会在“Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010(2010 年度诺贝尔物理学奖的科学背景)”一文中所指出的,“石墨烯研究的难点不是制备出石墨烯结构,而是分离出足够大的、单个的石墨烯,以确认、表征以及验证石墨烯独特的二维特性. 这正是安德烈·盖姆和康斯坦汀·诺沃肖洛夫的成功之处”. 2004 年 10 月 22 日,安德烈·盖姆和康斯坦汀·诺沃肖洛夫在 Science 上发表论文报道了石墨烯的制备、确认和表征<sup>[4]</sup>. 他们使用一种简单有效的机械剥离方法,从石墨晶体中分离出高质量的单层和少层石墨烯(见图 3),并将之成功转移到硅基底上,提出了如何利用光学显微镜在多层石墨中寻找和定位石墨烯. 此外,他们还系统研究了其电学性能,发现这些石墨烯具有双极性电场效应、很高的载流子浓度和迁移率,而且其载流子可在

电子和空穴之间连续调控,并具有亚微米尺度的弹道输运特性<sup>[4]</sup>.同年12月,美国佐治亚理工学院的 Walt de Heer 通过在高真空下去除 SiC 表面的硅也制备出了超薄石墨烯<sup>[19]</sup>.

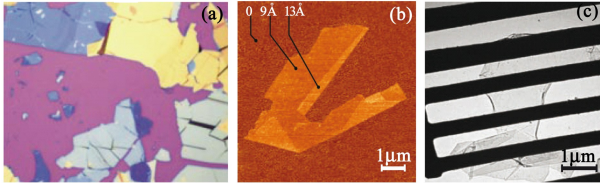


图3 (a)不同厚度的石墨在光学显微镜下呈现出不同的颜色<sup>[22]</sup>; (b)石墨烯的原子力显微镜照片(图中数字给出了不同位置的高度);(c)石墨烯的透射电子显微镜照片<sup>[9]</sup>

安德烈·盖姆和康斯坦汀·诺沃肖洛夫的研究工作带来了全世界范围内的石墨烯研究热潮,自2005年以来,有关石墨烯的研究发展呈现出爆炸式增长<sup>[9,20-22]</sup>.一方面,石墨烯独特的电子结构和载流子特性被广泛用于验证物理学中的一些重要理论,另一方面,石墨烯的制备技术快速发展,新奇物性层出不穷,实际应用逐步成为可能.目前以石墨烯为主题发表在 *Science*, *Nature*, *Applied Physics Letters* 和 *Physical Review* 系列杂志上的论文大约有2200多篇,其中只有28篇发表于2005年以前<sup>[21]</sup>.因此,在很大程度上,石墨烯的机械剥离方法的提出、较大尺寸石墨烯的制备及其确认和表征,极大地推动了石墨烯的研究.

### 3 无质量的狄拉克费米子:石墨烯奇特的载流子特征

石墨烯最令人惊奇的是其独特的电子结构和载流子特性(见图4).2005年曼彻斯特大学的安德烈·盖姆研究与哥伦比亚大学的 Kim 研究组在 *Nature* 的同一期上先后发表了论文<sup>[7,23]</sup>,报道了石墨烯独特的二维电子气特性.他们对石墨烯的量子霍尔效应的研究证实了石墨烯是一种具有奇异性能的导体,其电子类似于无质量的费米子.

传统的半导体材料中的电子可以看成是遵循牛顿运动定律的粒子,其能量依赖于动量的平方,因此电子的量子力学行为可以用薛定谔方程来描述<sup>[9,20,22]</sup>.由于六角形晶格的对称性,石墨烯中电子的行为与传统的半导体材料不同.其能量与动量存在线性关系,因此与狄拉克方程描述的基本粒子具有相同的量子动力学行为<sup>[7,9,20,22,23]</sup>.石墨烯的价带和导带在狄拉克点交叉,费米面附近电子和空穴的色散呈线性关系.因为有效质量取决于能带的曲率,所以线性色散关系决定了石墨烯的载流子具有零有

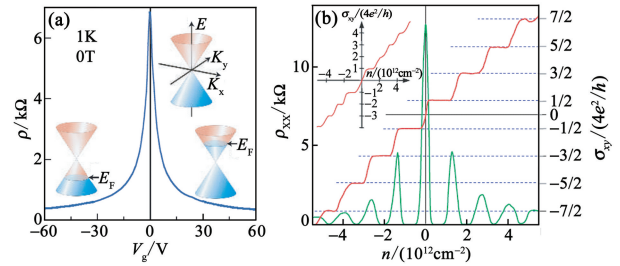


图4 (a)石墨烯的双极性电场效应<sup>[9]</sup>(插图为石墨烯在低能区的双锥形电子结构);(b)石墨烯的量子霍尔效应(插图为双层石墨烯的霍尔电导<sup>[7]</sup>)

效质量,表现出类似于光子的行为,以1/300光速的恒定速度运动.因此,石墨烯中载流子的行为可以用无质量的费米子的狄拉克方程来描述.

安德烈·盖姆与 Kim 研究组通过测量石墨烯的电子对于电场和磁场的反应,描绘出了石墨烯不同寻常的线性色散曲线<sup>[7,23]</sup>.他们还通过系统调控费米面的位置测量了石墨烯的电导,发现即使在没有载流子存在的价带和导电交叉的狄拉克点也可以导电,其电导率为量子电导量级.其费米面水平可以通过电场调节,并且通过水或氨气的吸附也可以对石墨烯进行掺杂.也正是由于这种独特的电子结构,石墨烯表现出不寻常的半整数量子霍尔效应<sup>[7,9,20,23]</sup>.另外,石墨烯的电子被严格地限制在二维平面,即使在室温下也可以观察到量子霍尔效应<sup>[24]</sup>,而对于传统的二维系统往往在低于液氮温度的超低温才可以观察到量子霍尔效应.最近,人们又发现石墨烯也可以表现出分数量子霍尔效应等<sup>[25,26]</sup>.

石墨烯独特的电子结构以及其载流子与狄拉克费米子的相似性也为粒子物理中难以观察到的相对论量子电动力学效应的验证提供了便捷的手段,如瑞典物理学家 Oskar Klein 提出的 Klein 隧穿<sup>[27]</sup>.Klein 隧穿是指对于垂直入射的无质量粒子不存在隧穿势垒,并且在某些条件下其势垒穿透率随能量振荡.然而长期以来,即使从原理上人们也不确信这一极不寻常的量子电动力学的预测是否能被验证.基于石墨烯独特的载流子特性,Katsnelson、安德烈·盖姆和康斯坦汀·诺沃肖洛夫在2006年提出了利用石墨烯验证该理论预测的可能性<sup>[28]</sup>,2009年哥伦比亚大学的 Young 和 Kim 利用石墨烯异质结从实验上验证了该理论<sup>[29]</sup>.

### 4 从基础研究到实用化:优异的性能与广阔的应用前景

除了独特的电子结构,石墨烯还具有一系列优异的性能.由于完美的成分和高度有序的晶格结构,

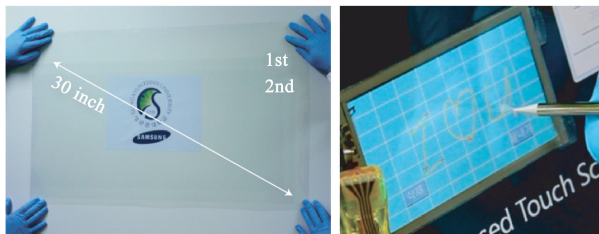


图5 用化学气相沉积方法制备的30inch的石墨烯(左图)和石墨烯触摸屏(右图)<sup>[36]</sup>

石墨烯表现出异乎寻常的高晶体学质量,在室温下仍能很好地保持其二维特性.在室温下,石墨烯具有远高于商用硅片的载流子迁移率,并且受温度和掺杂效应的影响很小,可以不受晶格缺陷和杂质原子的散射来进行传输,表现出室温亚微米尺度的弹道传输特性<sup>[4,7,9,20,22]</sup>.石墨烯几近透明,在很宽的波段内光吸收只有2.3%<sup>[30]</sup>.此外,石墨烯具有百倍于钢的强度,很好的柔韧性和伸展性,高达2600m<sup>2</sup>/g的超高比表面积和10倍于铜的超高热导率<sup>[31,32]</sup>.

石墨烯优异的物理性质使它有可能在电子、信息、能源、交通等多个领域获得重要的实际应用,这也正是石墨烯的另一迷人魅力所在.石墨烯具有极高的电子迁移率,因此是一种极具潜力的高频电子器件材料<sup>[3,6,8,20]</sup>.2008年,康斯坦汀·诺沃肖洛夫等报道了石墨烯单电子场效应管<sup>[33]</sup>,IBM也已研制出截止频率高达100GHz的石墨烯场效应管<sup>[34]</sup>.石墨烯完美的结构还可以使其用于超灵敏的传感器,以探测极低水平的污染<sup>[35]</sup>.此外,石墨烯也可以作为超薄、超强、透明的柔性导体<sup>[36]</sup>,来替代脆性、昂贵的氧化铜锡,在触摸屏、液晶显示和太阳能电池等方面获得广泛应用.最近,制备大尺寸石墨烯的化学气相沉积技术的发展极大地促进了该领域的进步<sup>[36-38]</sup>.采用可工业化的方法,韩国三星公司和成均馆大学的研究人员制备出了30英寸的石墨烯,其性能已经超过了目前商用的氧化铜锡薄膜<sup>[36]</sup>(见图5).在仅仅添加少量石墨烯的情况下,聚合物的导电性、强度、热稳定性和玻璃相转变温度都可得到很大程度的提高<sup>[39,40]</sup>.石墨烯超强、超薄、韧性以及密度小的特点使其可以作为超强复合材料,用于卫星、飞机以及汽车等领域.此外,石墨烯在锂离子电池、超级电容器、光电子、场发射等方面也表现出巨大的潜力<sup>[20,41-44]</sup>.

单原子厚度的石墨烯没有体相原子的存在,所以把石墨烯看成大分子,通过化学反应来制备新材料以改变石墨烯的性能并扩展其应用已成为最近出现的一个新的研究方向,也是石墨烯化学的重要研究内容<sup>[20]</sup>.2009年,安德烈·盖姆和康斯坦汀·诺沃肖洛夫通过

在石墨烯的每个碳原子上增加一个氢原子,实现了对其电学性能的调控,制备出具有绝缘特性的石墨烯衍生物——石墨烷<sup>[45]</sup>;最近他们又通过将石墨烯与氟原子反应制备出稳定、耐高温的氟化石墨烯,该材料同时具有石墨烯和特氟龙的优点<sup>[46]</sup>.

## 5 结束语

天马行空的研究风格、完美的二维晶体、无质量的费米子特性、优异的性能和广阔的应用前景,石墨烯的发现不仅带来了人们思维观念上的改变,给物理学注入了新的生机和活力,也带来了许多技术领域的突破.石墨烯的独特性和应用领域还不仅仅如此,没有人会知道明天又会有什么新的现象被发现;也没有人会知道,安德烈·盖姆在将来又会带给人们什么新的发现.“我希望石墨烯会像塑料一样改变我们的生活”,安德烈·盖姆说.

## 参考文献

- [1] The Science Watch, Interview, Konstantin Novoselov, December 2008
- [2] The Science Watch, Interview, U. Manchester's Andre Geim: Sticking with graphene—for now, August 2008
- [3] Berry M V, Geim A K. Eur. J. Phys., 1997, 18: 307
- [4] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* Science, 2004, 306: 666
- [5] Geim A K, Dubonos S V, Grigorieva I V *et al.* Nature Mater., 2003, 2: 461
- [6] Novoselov K S, Geim A K, Dubonos S V *et al.* Nature, 2003, 426: 812
- [7] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* Nature, 2005, 438: 197
- [8] Novoselov K S, Jiang D, Fchedin F *et al.* Proc. Natl. Acad. Sic. USA, 2005, 102: 10451
- [9] Geim A K, Novoselov K S. Nature Mater., 2007, 6: 183
- [10] Wallace P R. Phys. Rev., 1947, 71: 476
- [11] McClure J W. Phys. Rev., 1956, 104: 666
- [12] Semenoff G W. Phys. Rev. Lett., 1984, 53: 2449
- [13] DiVincenzo D P, Mele E J. Phys. Rev. Lett., 1984, 29: 1685
- [14] Boehm H P, Clauss A, Hofmann U *et al.* Zeitschrift Fur Naturforschung B, 1962, 17: 150
- [15] Eizenberg M, Blakely J M. Surf. Sci., 1979, 82: 228
- [16] van Bommel A J, Crombeen J E, van Tooren A. Surf. Sic., 1975, 48: 463
- [17] Boehm H P, Setton R, Stumpp E. Pure & Appl. Chem., 1994, 66: 1893
- [18] Lu X K, Yu M F, Huang H *et al.* Nanotechnology, 1999, 10: 269
- [19] Berger C, Song Z M, Li T B *et al.* J. Phys. Chem. B, 2004, 108: 19912
- [20] Geim A K. Science, 2009, 324: 1530
- [21] Wilson M. Phys. Today, 2010, 63(12):14
- [22] Geim A K, Kim P. Scientific American, 2008, 298: 90
- [23] Zhang Y B, Tan Y W, Stormer H L *et al.* Nature, 2005, 438: 201
- [24] Novoselov K S, Jiang Z, Zhang Y B *et al.* Science, 2007, 315: 1379
- [25] Bolotin K I, Ghahari F, Schulman M D *et al.* Nature, 2009,

462; 196  
 [26] Du X, Skachko I, Duerr F *et al.* Nature, 2009, 462: 192  
 [27] Klein O, Z. Phys., 1929, 53: 157  
 [28] Katsnelson M I, Novoselov K S, Geim A K. Nature Phys., 2006, 2: 620  
 [29] Young A F, Kim P. Nature Phys., 2009, 5: 222  
 [30] Nair R, Blake P, Grigorenko A *et al.* Science, 2008, 320: 1308  
 [31] Lee C, Wei X D, Kysar J W *et al.* Science, 2008, 321: 385  
 [32] Balandin A A, Ghosh S, Bao W Z *et al.* Nano Lett., 2008, 8: 902  
 [33] Ponomarenko L A, Schedin F, Katsnelson M I *et al.* Science, 2008, 320: 356  
 [34] Lin Y M, Dimitrakopoulos C, Jenkins K A *et al.* Science, 2010, 327: 662  
 [35] Schedin F, Geim A K, Morozov S V *et al.* Nature Mater., 2007, 6: 652

[36] Bae S, Kim H, Lee Y *et al.* Nature Nanotechnol., 2010, 5: 574  
 [37] Kim K S, Zhao Y, Jang H *et al.* Nature, 2009, 457: 706  
 [38] Li X S, Cai W W, An J H *et al.* Science, 2009, 324: 1312  
 [39] Stankovich S, Dikin D A, Dommett G H B *et al.* Nature, 2006, 442: 282  
 [40] Ramanathan T, Abdala AA, Stankovich S *et al.* Nature Nanotechnol., 2008, 3: 327  
 [41] Yoo E, Kim J, Hosono E *et al.* Nano Lett., 2008, 8: 2277  
 [42] Stoller M D, Park S J, Zhu Y W *et al.* Nano Lett., 2008, 8: 3498  
 [43] Wu Z S, Pei S F, Ren W C *et al.* Adv. Mater., 2009, 21: 1756  
 [44] Bonaccorso F, Sun Z, Hasan T *et al.* Nature Photonics, 2010, 4: 611  
 [45] Elias D C, Nair R R, Mohiuddin T M G *et al.* Science, 2009, 323: 610  
 [46] Nair R R, Ren W C, Jalil R *et al.* Small 2010 DOI: 10.1002/smll.201001555



· 书评和书讯 · **科学出版社物理类重点图书推荐**

书名	作(译)者	书名	作(译)者
<b>中国科学技术经典文库·物理卷</b>		<b>现代物理基础丛书</b>	
理论物理第一册 古典动力学	吴大猷	高等结构动力学	李东旭
理论物理第二册 量子论与原子结构	吴大猷	微分几何入门与广义相对论	梁灿彬、周彬
理论物理第三册 电磁学	吴大猷	现代声学理论基础	马大猷
理论物理第四册 相对论	吴大猷	物理学中的群论(第二版)	马中骥
理论物理第五册 热力学、气体运动论及统计力学	吴大猷	计算物理学	马文澍
理论物理第六册 量子力学(甲部)	吴大猷	物理学家用微分几何(第二版)	侯伯元 侯伯宇
理论物理第七册 量子力学(乙部)	吴大猷	相互作用的规范理论(第二版)	戴元本
半导体物理基础	黄昆 韩汝琦	输运理论(第二版)	黄祖洽
群论及其在物理学中的应用	谢希德 蒋平 陆奋	数学物理方程及其近似方法	程建春
<b>近期新书</b>		高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊
薄壁构件稳定理论及其应用	周绪红 等	狭义相对论(第二版)	刘辽
可压缩湍流直接数值模拟	傅德薰 等	量子光学导论	谭维翰
先进低成本医疗技术	刘静 等	经典电动力学	曹昌祺
无损检测技术及其应用(第二版)	张俊哲	<b>国外物理名著系列</b>	
高等量子力学(第二版)	张永德	量子力学原理	P. A. M. Dirac
全光开关原理	李淳飞	液晶物理学	P. G. de Gennes
纳米光电子器件	彭英才 傅广生	实用量子力学	S. Flugge
现代光学基础与前沿	林强、叶兴浩	相变和晶体对称性	Y. A. Izyumov
多孔介质多场耦合作用及其工程响应	赵阳升	量子系统中的几何相位	A. Bohm
火星——关于其内部、表面和大气的引论	Nadine G. Barlow 著, 吴季等译	自组织纳米材料	Motonari Adachi, D. J. Lockwood
10000个科学难题物理卷	编委会	光学与激光	M. Young
火灾风险评估方法学	范维澄 等	飞秒激光脉冲	C. Rullière
超常规能源技术	刘静 等	量子光学	M. Orszag

更多信息请访问 <http://www.sciencep.com/>  
 邮购电话:010-64034558  
 如有其他需要,请咨询编辑部  
 联系人:钱俊,64017957,qianjun@mail.sciencep.com