

分子器件的研究进展*

李荣金 李洪祥 汤庆鑫 胡文平[†]

(中国科学院化学研究所有机固体重点实验室 北京 100080)

摘要 分子器件作为下一代电子器件近年来得到了迅速的发展. 文章回顾了分子器件的发展历程和研究现状, 并重点对分子导线、分子开关、分子整流器和分子晶体管等器件进行了介绍.

关键词 分子器件, 分子导线, 分子开关, 分子整流器, 分子晶体管

Molecular devices

LI Rong-Jin LI Hong-Xiang TANG Qing-Xin HU Wen-Ping[†]

(Key Laboratory of Organic Solids, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract As the next generation of electronic devices molecular devices have developed rapidly in recent years. The history and current status of molecular devices will be reviewed, with emphasis on molecular devices such as molecular wires, switches, rectifiers and transistors.

Keywords molecular devices, wires, switches, rectifiers, transistors

1 引言

电子学的发展极大的促进了人类社会的发展. 从真空电子学到固体电子学再到微电子学, 器件的尺寸越来越小, 而功能越来越强. 集成电路出现以后, 电子器件更是被广泛应用于生产和生活的各个领域. 设计和制造体积更小、信息处理能力更强的器件是未来信息技术发展的关键. 传统的硅基器件由于受基本物理规律和制造工艺的限制, 其尺寸不可能无限地减小. 通常人们认为 20—30nm (即 p-n 结耗尽区的宽度) 可能是器件特征尺寸的物理极限. 在接近这个极限时, 量子效应 (如载流子隧穿等) 会造成器件漏电流的增加, 并且制造成本会大幅度提高, 这是我们不想看到但却又是不可避免的. 如何超越这些极限, 推动电子学的进一步发展成为本世纪初世界范围内所面临的最重大科学问题之一.

分子电子学是一门新兴的学科, 从其概念的提出到现在不过几十年的历史. 尽管如此, 随着测量手

段的进步, 人们从实验和理论两方面都取得了巨大的进步^[1,2]. 近年来大量研究表明, 采用自下而上的路线, 发展分子电子学进而构建分子器件和分子电路, 完全有希望突破传统器件的物理极限, 实现电子学的又一次飞跃. 分子器件 (分子电子器件) 是指构建在单个分子或有限个分子上的具有特定功能的器件, 其尺寸在纳米量级, 使用的材料有纳米线、纳米管、纳米颗粒、有机小分子、生物分子、DNA 等. 传统的电子器件只利用了电子波粒二象性的粒子性, 且都是通过控制电子数量来实现信号处理的. 随着集成度的提高, 功耗、速度、漏电都将成为严重的问题. 分子器件主要利用电子的量子效应工作. 在分子器件中, 只要控制一个电子的行为即可完成特定的功能, 即分子器件不单纯通过控制电子数目的多少, 主要是通过控制电子波动的相位来实现特定功能的.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号 2006CB806200)、国家自然科学基金 (批准号 20421101) 资助项目

2005-12-02 收到初稿, 2006-09-06 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: huwp@iccas.ac.cn

分子器件在响应速度和功耗方面可以比传统器件提高 1000—10000 倍。由于分子器件具有更快的响应速度和更低的功耗,从而有望从根本上解决日益严重的功耗、发热等问题。分子电子学理论研究的深入和分子器件性能的不断提高最终会把电子工业技术推向一个更高的发展阶段。

分子器件的概念可以追溯到 1959 年 Feynman^[3]在美国物理学会年会上有一个著名幻想演讲:“我不打算讨论我们如何使计算机小规模化,但计算机确实太过于庞大了。我们为什么不使它变的非常的小,使导线变得非常的小,使元件变的非常的小?我指的是非常非常的小,如导线直径只有 10 或 100 个原子的级别,而电路则只有几千埃,这样就使它变得足够的小。在我看来,物理学的规律不排除做成如此小规模计算机,事实上,这样做却还存在某些优点”。但以当时的科技水平,这种想法无疑是一种幻想。直到 20 世纪 70 年代,科学家们才逐步提出了分子器件的一些初步设想^[4]。此后,分子器件的研究进入了有实际内容的开创阶段。80 年代后期,随着扫描探针显微技术、电子束加工技术等技术手段的不断完善,分子器件的研究取得了许多实质性的进展。分子电子学的最终目标是设计出具有极高速度的数据处理和计算能力的超级分子计算机^[5],从而可以执行更复杂的程序,推动人工智能的发展。分子导线、分子开关、分子整流器和分子晶体管等是分子电路不可或缺的组成元件,因此近年来关于这些器件的研究较多,取得了不少进展。尤其是 2000 年以后,科学家们能将单个的分子器件相互连接起来,构成具有逻辑功能和运算功能的“分子电路”,朝着分子电子学的实现迈出了关键性的一步。本文综述了几种重要的分子器件的发展。

2 分子导线

分子导线是分子器件之间或分子器件与宏观世界连接的桥梁,是实现分子电路的关键单元。分子导线通常是具有一定长度的共轭分子,在这种分子中,高度离域的 π 轨道提供了电子传输的路径。从分子器件概念的提出^[4]到现在,分子导线的发展得到了广泛的关注。分子导线的深入发展对研究分子体系电荷传输的机理具有重要意义。

分子导线的种类很多,目前研究热点主要有聚苯乙炔(PPE)及其衍生物等碳链型分子导线^[6-10],卟啉环分子导线^[11,12],DNA 分子导线^[13-16]等。可

以看出,它们的共同点是都具有离域的 π 共轭体系,电子可以通过这些分子的 π 体系自由传输。

碳纳米管在原子层次上具有完美的结构,代表了另一类分子导线材料^[17]。近年来,碳纳米管的制备技术^[18]有了很大的提高,对它电性能的研究^[19-23]也越来越受到人们的重视。通常认为碳纳米管和电极的接触电阻是碳纳米管导线电阻的主要来源。Bachtold^[24]等采用四探针系统对多壁碳纳米管和电极的接触问题做了研究。发现通过扫描电子显微镜(SEM)电子束选择性照射接触区后,接触电阻可减小数个量级。

分子导线通常被作为一维导电体系处理,但由于它们强烈的集聚倾向(溶液和固相中均存在),实际的结果往往是二维或三维的。这阻碍了单分子导线的应用。把绝缘分子通过共价键(或其他作用力)连接在分子导线骨架上形成包裹体系是解决问题的方法之一。2000 年, Buey 和 Swager^[25]合成了有绝缘体包裹的梯形聚合物分子导线。随后, Hecht 等^[26]报道了用树枝状聚合物包裹的分子导线等体系。绝缘烷包裹的分子导线也有报道^[27]。最近, Li^[28]等自组装水溶性的聚噻吩衍生物和多糖衍生物 SPG,形成 SPG 包裹的分子导线。这是第一次报道的螺旋状手性超分子包裹的分子导线。

在分子导线合成方面,莱斯大学(Rice University)的 Tour 研究组贡献突出^[29]。用他们的方法可以合成各种有确定长度的分子导线(被称为 Tour wire),还可在分子的末端加上某些起连接作用的基团(如 -SH 等),以便同金属电极或其他功能分子连接。

分子导线电性能表征和测试要比其合成困难得多。人们从理论和实验两方面做了不断的尝试。早在 1960 年, McConnell^[30]就通过理论计算预言分子导线中隧穿电流和夹在两电极之间的分子长度呈指数关系。随后的研究^[31-33]表明, McConnell 的预言是正确的。在一定长度范围内,分子导线(金属/分子导线/金属结)的电导率和长度的依赖关系为: $G = G_0 e^{-\gamma L}$, 其中 G_0 为接触电导率, γ 为衰减因子, L 为分子长度。

对分子导线电性能测量主要有两种方法:一种是直接把导线置于两电极之间或电极和测量仪器(STM 或 AFM 等)的针尖之间进行测量(直接法)^[34-38];另一种是在分子导线两端分别引入富电子和缺电子的端基(通常为过渡金属)通过相对简单的谱学测量即可得到电子通过导线传输的信息(间接法)^[8,39,40]。

需要指出的是,在直接法中,导线和电极的连接会影响分子的电性质.通常比较好的办法是在导线中引入巯基等基团,从而可以和金电极形成稳定的共价键,减小测量误差.在间接法中,不管端基是金属还是有机分子,它们的性质都会对测量造成一定的影响,这在测量和应用中必须予以考虑.

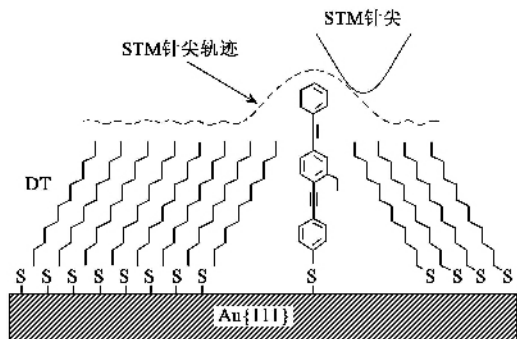


图1 利用STM测量单分子的电性质示意图[分子通过自组装连接在金基板上,并被不导电的十二硫醇(DT)自组装单层膜(SAM)隔开,通过STM可以确定被测分子的确切位置,从而可以测量单个分子的电学性质^[36].图中S为硫原子]

3 分子开关

开关是电子线路中的基本控制单元.分子开关是一种具有双稳态的量子化体系,当外界条件(光、电、热、磁等)发生变化时,分子可以在两种状态之间进行转换,这两种状态由于电阻的高低不同而对应于电路的通或断,从而构成开关.

由于分子的导电性很大程度上决定于其 π 轨道的重叠程度,因此,任何能够改变分子共轭程度的外界刺激都可能改变分子的导电性,从而构成开关^[41-44].例如,还原共轭体系中的双键或氧化其中的单键,均能破坏分子的共轭,从而大大降低其导电性,构成开关. Steenwinkel等^[43]研究了图2所示分子的开关效应.还原前二苯基团中间的单键具有部分双键的性质,因此分子共面,具有较好的导电性;分子得到两个电子还原后,两个苯环之间产生 36° 的扭角,共轭体系破坏,导电性能降低.这两种构型(平面和扭曲)之间的转变是可逆的,从而构成了分子开关.通过氧化-还原过程实现开关效应的最大缺点是开关速度可能会较慢,这会限制实际应用.

轮烷(rotaxane)和索烃(catenane)是目前人们研究较多的两类分子.1999年,Heath研究组^[45]报道了一种轮烷电双稳材料开关.此开关初始处于“关态”,施加 $+0.7V$ 的氧化电压可使开关不可逆

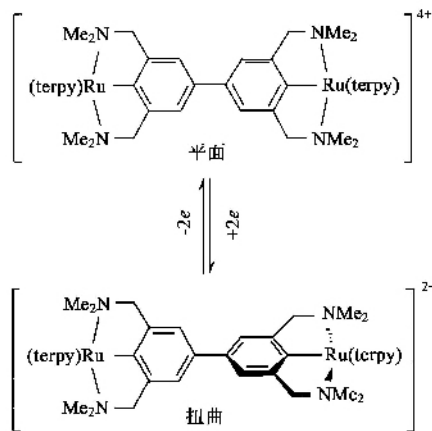


图2 通过氧化-还原反应改变分子的共轭状态从而获得开关效应^[43](图中 Me_2 为甲基分子,terpy为三吡啶)

地变为“开态”.处于“开态”的开关可以在适当的负压下读取其状态.在 $-2V$ 电压下,“开态”电流是“关态”的60—80倍. Heath等还用这种开关制作了AND和OR逻辑门.但用这种材料制作的开关只能开不能关,用做存储器,则只能做一次性写入的只读存储器.索烃由两个环状分子套在一起组成,两个环可发生相对运动.在其中一个环上引入不同的位点,也可以构成双稳态分子开关. Stoddart和Heath等^[46]将一种具有双稳态的索烃组装为单层膜,夹在两个电极之间.在 $\pm 2V$ 电压作用下,索烃分子膜可以进行可逆的开关(过程见图3),克服了上述轮烷不可逆的缺点.开关打开时,电路可以在 $0.1V$ 电压下导通,而在开关关闭时,电路不能在 $0.1V$ 电压下导通.通常条件下,此开关在两个月内经历数百次开关后性质无明显改变.关于其他轮烷和索烃在分子开关中的应用请参阅文献^[47],这里不再详细论述.

光化学手段是另一种实现分子开关的有效方法.在这种开关中,分子的活性基团吸收光子,产生电性能不同于基态的激发态,从而可能产生开关效应.由于激发态的寿命非常短,相对于基于氧化-还原过程的开关,光致开关的响应速度要快得多. Wasielewski研究组在光控分子开关方面贡献卓越.1998年,他们报道了一个基于分子体系光响应的高速开关^[48].这个分子由两部分连接组成,其中每一部分都包括一个电子给体(D)和一个电子受体(A).分子受光照射时会发生电子从一个给体的激发态($*D$)向临近受体的电子转移,从而产生瞬间离子对($D^+ - A^-$).这个离子对产生的电场可完全

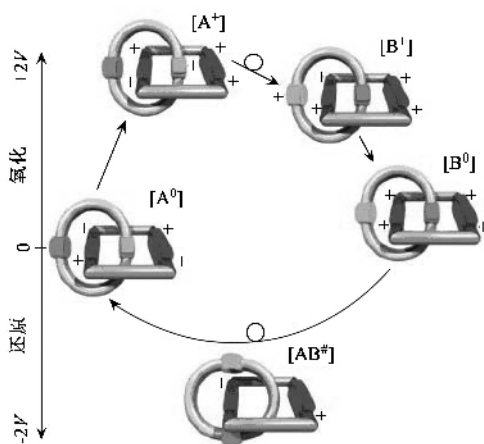


图3 索烃开关器件的工作原理。[A⁰]既是分子的基态,也是器件的“开态”。当索烃在+2V偏压下被氧化时,分子中的四硫富瓦烯(TTF)单元离子化,与从其中穿过的CBPQT⁴⁺环产生库仑斥力,从而导致环旋转形成构型[B⁺]。当偏压降为接近0时,分子结构变为[B⁰]。此时分子处于“关态”。在-2V偏压下,部分还原CBPQT⁴⁺可经[AB[#]]构型重新回到[A⁰]态(实际过程中[AB[#]]的还原态未知)^[46]

阻止另一个D-A部分的光致电子转移。由于过程中产生的离子对的寿命小于1ns,因此,此开关过程将非常快。此后他们又报道了另一个类似体系的光开关效应^[49]。这种超快开关在分子电路中有望发挥重大作用。

4 分子整流器

整流器是电路中不可缺少的单元,分子整流器由于其在理论和实践中的重要性而成为研究最多的器件之一。1974年,Aviram和Ratner关于分子整流设想^[4]的提出打开了分子整流器研究的大门。当时,他们描述了一种在有机电子给体(D)和受体(A)之间有饱和键(σ 桥)连接的非对称分子(简称为D- σ -A),分子中D单元是四硫富瓦烯(TTF),A单元是四氰基对二甲基苯醌(TCNQ)。他们认为,如果把这种分子夹在两个电极之间,就可以构成一个整流器。在合适的电压下,电子从A到D传输顺利,而从D到A的传输需要大得多的电压,从而可能具有整流效应。

在AR模型提出后,人们合成了很多D- σ -A型分子,但至今还没有合成出AR模型所提出的分子(同一分子中近距离存在强的D和强的A单元,合成困难),从实验上确认这些分子的整流性能遇

到了挑战。尽管在有的D- σ -A型分子中观察到了整流性能^[50],但这种整流可能只是一种界面效应^[51],并非来自分子本身。

AR模型受到挫折后,人们从另外的角度进行了探索。近年来不少研究者的目光集中于D- π -A型分子C₁₆H₃₃Q-3CNQ的LB单层膜或多层膜上^[52-58](分子结构见图4)。Metzger等对分子C₁₆H₃₃Q-3CNQ的整流效应进行了模拟计算和深入理论分析,他们认为,分子整流器件的整流不但与AR模型中所说的加电压前分子的LUMO(最低空轨道)和HOMO(最高占据轨道)相对于金属电极的费米能级的位置不对称有关,而且还与加偏压后它们的偏移有关,即整个整流分子在加偏压后的静电势分布有关。他们通过理论计算指出,对整流分子C₁₆H₃₃Q-3CNQ的器件施加偏压时,大部分电压都加在了分子中的绝缘烷基链上,引起电势分布的不对称,从而导致整流^[52]。他们把这种整流称为A型(asymmetric)整流,即由于长烷基链的存在,使整流功能基团处于器件中的不对称位置而引起整流。



图4 D- π -A型分子C₁₆H₃₃Q-3CNQ的结构^[52]

基于对分子C₁₆H₃₃Q-3CNQ研究的结果,人们进行了更深入的探索。Whitesides等分别在银电极和滴汞电极上生长单分子膜(分子为TCNQ通过饱和和脂肪链共价连接在巯基上),再使两层单分子层接触得到器件,实验得到了可观的整流效果(>10)。这证明,只用一个受体基团加一个绝缘的链桥也可实现整流^[59]。这开辟了一个不同于AR模型的实现整流的新方向。

Troisi和Ratner从理论上提出,在外电场诱导下,分子可能发生构形变化(如在两种同分异构体之间转变),如果两种状态对应于的电导率差别很大,也可以引起整流^[60]。近年来的实验也证明了这种方法的可能性^[61-63]。

最近,中国科学院化学研究所有机固体重点实验室刘云圻研究员及其合作者利用超临界流体技术大量制备串珠状多壁碳纳米管——半导体纳米球异质结构,他们利用单根的这种异质结构制作了Schottky

二极管,得到了高达 $70 (\pm 2.5 \text{ V})$ 的整流比^[64]. 中国科学技术大学的侯建国等利用单个 C_{59}N 分子制作了新型的分子整流器. 这种整流器利用双势垒隧穿结中单电子的隧穿效应工作, 实验中观察到了明显的整流效应^[65]. 这些结果代表了另一类分子整流器.

Metzger 对单分子整流有详细的论述, 请参阅文献 [66].

5 分子场效应晶体管

场效应晶体管 (FET) 可以说是计算机中最关键的器件. 它要同时具备开关和增益功能, 以维持电路中电信号正常的电平. 随着器件尺寸的减小, 基本的放大单元将由三极晶体管变为三极单电子管 (SET, 图 5). SET 的工作原理是量子隧穿, 主要是金属-绝缘体-金属间的隧穿效应. 当金属电极的势垒足够窄时, 费米能级上的电子能够隧穿通过绝缘层, 形成隧穿电流. 初步研究结果表明, SET 具有极高的灵敏度. 在探测量子隧穿现象时, 它的灵敏度比传统晶体管高三个数量级.

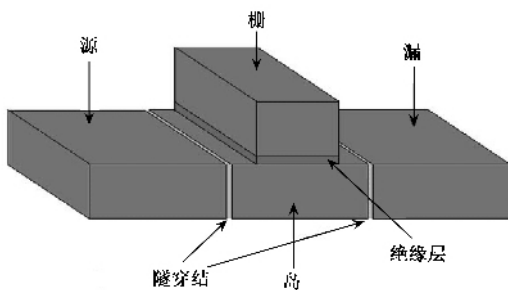


图5 SET结构示意图. 纳米级的金属岛代替了FET的导电沟道, 源、漏电极通过隧穿结和这个岛相连^[67]

Devoret 和 Schoelkopf 研究了用 SET 放大电子信号^[67]. 他们指出, 传统计算机中表示二进制 0 和 1 态的“bit”将被“qubit”代替. 因为载流子的波动性显著, 保留有相位信息, 在输运和加工过程中将会发生信号的彼此纠缠, 因此 SET 的输出是与纠缠态有关的量子信号.

在分子场效应晶体管器件的发展过程中, 人们首先利用碳纳米管获得了突破, 制成了由单个碳纳米管构成的场效应管 (TUBEFET)^[68-71].

除了碳纳米管外, 其他材料的研究也取得了很大进展^[72-74]. 其中具有代表性的是 Park 等的工作^[75]. 它们利用图 6 (左上) 所示的分子在 SiO_2 衬底上设计 SET, 实验得到了如图 6 所示的 $I-V$ 曲线.

可以看出, 随栅压的改变, 源漏之间的电流被很好地调控, 曲线不是传统的平滑曲线, 而是台阶状的, 呈现出载流子传输的量子特性.

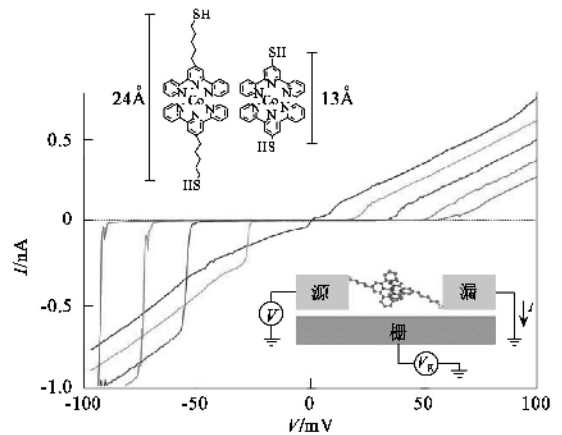


图6 不同栅压下的 $I-V$ 曲线. 左上图为实验使用的分子, 右下图为器件结构示意图^[75]

6 总结与展望

Aviram 和 Ratner 关于分子整流器概念的提出^[4] 标志着现代分子电子学的开始. 经过 30 多年的发展, 人们在理论和实践两方面都取得了巨大的进步^[1,2]. 除了上述器件外, 分子存储器件^[76]、分子马达^[77-81] 等领域也取得了不少进展. 然而, 我们在欣喜的同时也应该注意到发展过程中的一些问题. 有的分子器件在其制作或测试过程中引起了一些争议^[82,83]. 譬如, 有人认为, Heath 教授等^[45] 报道的轮烷分子因为固定在两个电极之间, 加外压可能使分子、电极、或分子与电极的连接遭到破坏, 从而改变器件的电导, 形成开关. 此外, 分子器件的互连、电路的组装等很多问题亟待解决, 要大规模地利用分子器件制造计算机芯片还有很长的路要走.

然而, 作为下一代电子器件, 分子器件代表了现代微电子学的发展方向, 它的进步和成熟是电子学发展的必然趋势. 从真空电子器件到微电子器件的变革是一次影响重大的科学和技术飞跃. 20 世纪 60 年代, 日本正是抓住了从电子管转型到晶体管这个机遇, 及时提出了“半导体立国”的发展战略, 一跃成为微电子工业大国. 从微电子器件到分子器件是另一次变革, 这次变革意义更为重大, 影响更为深远. 此外, 分子器件的研究涉及到新材料、新器件、新原理、新技术等诸多方面, 有大量的科学问题需要探索, 是一门新兴的交叉科学. 对分子器件的研究必将带动其他学科的发展. 我国自“七五”以来, 就对与

分子器件相关的一些研究进行过支持,经过科研人员近30年的不懈奋斗,已经有了相当的基础,在国际上具有一定的影响。近年来,我国的综合国力已经有了前所未有的提高,使得我们有能力参与分子器件的国际竞争。如能及时组织力量,明确攻关目标,充分发挥化学家、物理学家、微电子学家以及工程技术人员的聪明才智和原创精神,再加上强有力的经费支持,我们定能把握机遇,推动我国电子学的发展,使我国分子器件的研究在国际上占有一席之地。

参 考 文 献

- [1] Joachim C, Gimzewski J K, Aviram A. *Nature*, 2000, 408 :541
- [2] Carroll R L, Gorman C B. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2002, 41 :4379
- [3] Richard Feynman gave this talk entitled " There's Plenty of Room at the Bottom " on December 29th, 1959, at the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology
- [4] Aviram A, Ratner M. *Chem. Phys. Lett.*, 1974, 29 :277
- [5] Tseng G Y, Ellenbogen J C. *Science*, 2001, 294 :1293
- [6] Huang S, Tour J M. *J. Am. Chem. Soc.*, 1999, 121 :4908
- [7] Francke V, Mangel T, Mullen K. *Macromolecules*, 1998, 31 :2447
- [8] Dembinski R, Bartik T, Bartik B *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2000, 122 :810
- [9] Blum A S, Ren T, Parish D A *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127 :10010
- [10] Davis W B, Svec W A, Ratner M A *et al.* *Nature*, 1998, 396 :60
- [11] Tsuda A and Osuka A. *Science*, 2001, 293 :79
- [12] Reimers J R, Hall L E, Crossley M J *et al.* *J. Phys. Chem. A*, 1999, 103 :4385
- [13] Grinstaff M W. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 1999, 38 :3629
- [14] Porath D, Bezryadin A, de Vries S *et al.* *Nature*, 2000, 403 :635
- [15] Kasumov A Y, Kociak M, Gueron S *et al.* *Science*, 2001, 291 :280
- [16] Fink H-W, Schonenberger C. *Nature*, 1999, 398 :407
- [17] Hamada N, Sawada S-I, Oshiyama A. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, 68 :1579
- [18] Jourmet C, Maser W K, Bernier P *et al.* *Nature*, 1997, 388 :756
- [19] Bockrath M, Cobden D H, McEuen P L *et al.* *Science*, 1997, 275 :1922
- [20] Odom T W, Huang J L, Kim P *et al.* *Nature*, 1998, 391 :62
- [21] Dai H, Wong E W, Lieber C M. *Science*, 1996, 272 :523
- [22] Frank S, Poncharal P, Wang Z L *et al.* *Science*, 1998, 280 :1744
- [23] Tans S J, Devoret M H, Dai H *et al.* *Nature*, 1997, 386 :474
- [24] Bachtold A, Henny M, Tarrier C *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73 :274
- [25] Buey J, Swager T M. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2000, 39 :608
- [26] Hecht S, Prof J M J F. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2001, 40 :74
- [27] Michels J, Anderson H, *Chem. Eur. J.*, 2003, 9 :6167
- [28] Li C, Numata M, Bae A H *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, 127 :4548
- [29] Tour J M. *Acc. Chem. Res.*, 2000, 33 :791
- [30] McConnell H J. *Chem. Phys.*, 1961, 35 :508
- [31] Wold D J, Haag R, Rampi M A *et al.* *J. Phys. Chem. B*, 2002, 106 :2813
- [32] Kondo M, Tada T, Yoshizawa K. *J. Phys. Chem. A*, 2004, 108 :9143
- [33] Magoga M, Joachim C, *Phys. Rev. B*, 1997, 56 :4722
- [34] Cui X D, Primak A, Zarate X *et al.* *Science*, 2001, 294 :571
- [35] Reed M A, Zhou C, Muller C J *et al.* *Science*, 1997, 278 :252
- [36] Bumm L A, Arnold J J, Cygan M T *et al.* *Science*, 1996, 271 :1705
- [37] Leatherman G, Durantini E N, Gust D *et al.* *J. Phys. Chem. B*, 1999, 103 :4006
- [38] Joachim C, Gimzewski J K, Schlittler R R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74 :2102
- [39] Creutz C and Taube H, *J. Am. Chem. Soc.*, 1973, 95 :1086
- [40] Schlicke B, Belser P, De Cola L *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 1999, 121 :4207
- [41] Lehn J - M and Tsivgouli G M *Adv. Mater.*, 1997, 9 :39
- [42] Tsuchiya S J. *Am. Chem. Soc.*, 1999, 121 :48
- [43] Steenwinkel P, Grove D M, Veldman N *et al.* *Organometallics*, 1998, 17 :5647
- [44] Gittins D I, Bethell D, Schiffrin D J *et al.* *Nature*, 2000, 408 :67
- [45] Collier C P, Wong E W, Belohradsk *et al.* *Science*, 1999, 285 :391
- [46] Collier C P, Mattersteig G, Wong E W *et al.* *Science*, 2000, 289 :1172
- [47] Pease A R, Jeppesen J O, Stoddart J F *et al.* *Acc. Chem. Res.*, 2001, 34 :433
- [48] Gosztola D, Niemczyk M P, Wasielewski M R. *J. Am. Chem. Soc.*, 1998, 120 :5118
- [49] Lukas A S, Miller S E, Wasielewski M R. *J. Phys. Chem. B*, 2000, 104 :931
- [50] Geddes N J, Sambles J R, Jarvis D J *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 51 :1916
- [51] Geddes N J, Sambles J R, Jarvis D J *et al.* *J. Appl. Phys.*, 1992, 71 :756
- [52] Krzeminski C, Delerue C, Allan G *et al.* *Phys. Rev. B*, 2001, 6408 :5405
- [53] Metzger R M, Chen B, Hopfner U *et al.* *J. Am. Chem. Soc.*, 1997, 119 :10455
- [54] Vuillaume D, Chen B, Metzger R M. *Langmuir*, 1999, 15 :4011
- [55] Chen B and Metzger R M. *J. Phys. Chem. B*, 1999, 103 :4447
- [56] Metzger R M. *J. Mater. Chem.*, 1999, 9 :2027
- [57] Metzger R M. *J. Mater. Chem.*, 2000, 10 :55
- [58] Xu T, Peterson I R, Lakshminantham M V *et al.* *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2001, 40 :1749

- [59] Chabinye M L , Chen X , Holmlin R E *et al.* J. Am. Chem. Soc. ,2002 ,124 :11730
- [60] Troisi A and Ratner M A. J. Am. Chem. Soc. ,2002 ,124 :14528
- [61] Yasuda S , Nakamura T , Matsumoto M *et al.* J. Am. Chem. Soc. ,2003 ,125 :16430
- [62] McCreery R , Dieringer J , Solak A O *et al.* J. Am. Chem. Soc. ,2003 ,125 :10748
- [63] Ashwell G J , Gandolfo D S. J. Mater. Chem. ,2002 ,12 :411
- [64] Fu L , Liu Z , Liu Y *et al.* Adv. Mater. ,2005 ,17 :217
- [65] Zhao J , Zeng C G , Cheng X *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2005 ,9504 :5502
- [66] Metzger R M. Chem. Rev. ,2003 ,103 :3803
- [67] Devoret M H , Schoelkopf R J. Nature ,2000 ,406 :1039
- [68] Tans S J , Verschueren A R M , Dekker C , Nature ,1998 ,393 :49
- [69] Bachtold A , Hadley P , Nakanishi T *et al.* Science ,2001 ,294 :1317
- [70] Derycke V , Martel R , Appenzeller J *et al.* Nano Lett. ,2001 ,1 :453
- [71] Xiao K , Liu Y , Hu P *et al.* J. Am. Chem. Soc. ,2005 ,127 :8614
- [72] Sato T , Ahmed H , Brown D *et al.* J. Appl. Phys. ,1997 ,82 :696
- [73] Park H , Park J , Lim A K L *et al.* Nature ,2000 ,407 :57
- [74] Liang W J , Shores M P , Bockrath M *et al.* Nature ,2002 ,417 :725
- [75] Park J , Pasupathy A N , Goldsmith J L *et al.* Nature ,2002 ,417 :722
- [76] Rueckes T , Kim K , Joselevich E *et al.* Science 2000 289 94
- [77] Simmel F C , Yurke B. Phys. Rev. E ,2001 ,6304 :1913
- [78] Li J W J , Tan W H. Nano Lett. ,2002 ,2 :315
- [79] Badjic J D , Balzani V , Credi A *et al.* Science ,2004 ,303 :1845
- [80] Kelly T R. Acc. Chem. Res. ,2001 ,34 :514
- [81] Sauvage J P. Acc. Chem. Res. ,1998 ,31 :611
- [82] Service R F. Science ,2003 ,302 :556
- [83] Flood A H , Stoddart J F , Steuerman D W *et al.* Science ,2004 ,306 :2055

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类新书推荐

| 书 名 | 作(译)者 | 定价 | 出版日期 | 发行号 |
|----------------------|--------------------------------|----------|-------------|--------|
| 薄膜材料——应力、缺陷的形成和演化 | L. B. Freund, S. Suresh 著 卢磊等译 | ¥ 86.00 | 2006 年 12 月 | O-2612 |
| 亚稳金属材料 | 胡壮麒 | 140 估计 | 2007 年 1 月 | 暂无 |
| 半导体异质结物理(第二版) | 虞丽生 | ¥ 52.00 | 2006 年 5 月 | O-2443 |
| 高等原子分子物理学(第二版) | 徐克尊 | ¥ 54.00 | 2006 年 9 月 | O-2488 |
| 辐射和光场的量子统计理论 | 曹昌祺 | ¥ 60.00 | 2006 年 3 月 | O-2463 |
| 实验物理中的概率和统计(第二版) | 朱永生 | ¥ 72.00 | 2006 年 3 月 | O-2464 |
| 物理学中的群论(第二版) | 马中骥 | ¥ 68.00 | 2006 年 2 月 | O-2421 |
| 微分几何入门与广义相对论(上册,第二版) | 梁灿彬, 周彬 | ¥ 59.00 | 2005 年 12 月 | O-2363 |
| 液晶光学与液晶显示 | 王新久 | ¥ 59.00 | 2005 年 12 月 | O-2424 |
| 量子信息物理原理 | 张永德 | ¥ 59.00 | 2005 年 12 月 | O-2347 |
| 相互作用的规范理论(第二版) | 戴元本 | ¥ 68.00 | 2005 年 6 月 | O-2148 |
| 计算物理学 | 马文淦 | ¥ 37.00 | 2005 年 5 月 | O-2147 |
| 物理学家用微分几何(第二版) | 侯伯元, 侯伯宇 | ¥ 98.00 | 2005 年 3 月 | O-1976 |
| 数学物理方程及其近似方法 | 程建春 | ¥ 58.00 | 2005 年 2 月 | O-1952 |
| 量子力学系统控制导论 | 丛爽 | ¥ 46.00 | 2006 年 1 月 | O-2369 |
| 计算电磁学要论 | 盛新庆 | ¥ 32.00 | 2005 年 3 月 | O-1900 |
| 窄禁带半导体物理学 | 褚君浩 | ¥ 120.00 | 2005 年 5 月 | O-2093 |
| 半导体量子器件物理 | 傅英, 陆卫 | ¥ 50.00 | 2005 年 1 月 | O-2004 |
| 准晶物理学 | 王仁卉 | ¥ 45.00 | 2004 年 8 月 | O-1802 |
| 软 X 射线射线与极紫外辐射的原理和应用 | 张杰 | ¥ 59.00 | 2003 年 9 月 | O-1682 |
| 拉曼布里渊散射——原理及应用 | 程光煦 | ¥ 48.00 | 2003 年 5 月 | O-1301 |
| 广义相对论和引力场理论 | 胡宁 | ¥ 15.00 | 2003 年 3 月 | O-1157 |

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书。如果您有出版意向,请和我们联系。凡购书者均免邮费,请按以下方式和我们联系:

电 话:010-64017957 64033515 电子邮件:mlhukai@yahoo.com.cn 或 dpyan@csppg.net

通讯地址:北京东黄城根北街 16 号 科学出版社 邮政编码:100717 联系人:胡凯 鄢德平

欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>