

## 参 考 文 献

- [ 1 ] T. A. Heath, The Thirteen Books of Euclid's Elements, Cambridge Univ. Press, (1908).
- [ 2 ] 艾鲍著,周民强译,早期数学史选编,北京大学出版社,(1990).
- [ 3 ] B. Altermann, *math. Intelligencer*, 12-4(1990), 43.
- [ 4 ] W. C. Waterhouse, *Arch. Hist. Exact. Sci.*, 9(1972), 212.
- [ 5 ] J. Kepler, Harmonices Mundi, J. Plancus et al., *Math. Intelligencer*, 17-3(1995), 23.
- [ 6 ] A. F. Wells, Three Dimensional Nets and Polyhedra, Wiley, (1977).
- [ 7 ] J. F. C. Hessel, Krystallogometrie, Engelmann, (1897).
- [ 8 ] W. Nowacki, *Z. Kristallogr.*, 86(1933), 19.
- [ 9 ] J. Makevitch, Shaping Space, A Polyhedral Approach, eds. M. Senechal and G. Fleck, Birkhäuser, (1988), 80.
- [ 10 ] P. J. Federico, Descartes on Polyhedra, Springer, (1982).
- [ 11 ] F. C. Frank and J. S. Kasper, *Acta Crystallogr.*, 11(1958) 184; 12(1959), 483.
- [ 12 ] C. B. Shoemaker and D. P. Shoemaker, *Acta Crystallogr.*, 16(1963), 997; 23(1967), 231.
- [ 13 ] G. Bergman, J. L. T. Waugh and L. Pauling, *Acta Crystallogr.*, 169(1952), 1057.
- [ 14 ] F. C. Frank, *Proc. Roy. Soc. London A*, 215(1952), 43.
- [ 15 ] D. R. Nelson, *Phys. Rev. B*, 28(1983), 5515.
- [ 16 ] H. S. M. Coxeter, A Spectrum of Mathematics, ed. J. C. Butcher, Oxford Univ. Press, (1971), 98.
- [ 17 ] H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien et al., *Nature (London)*, 318(1985), 162.
- [ 18 ] J. Baggott, Perfect Symmetry, The Accidental Discovery of Buckminsterfullerene, Oxford Univ. Press, (1994).
- [ 19 ] C.-H. Sah, *Croat. Chem. Acta*, 66(1993) 1; B. Kostant, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 91(1994) 11714; P. W. Fowler and D. E. Manolopoulos, An Atlas of Fullerene, Oxford Univ. Press (1995).
- [ 20 ] J. Donohue, The Structure of Elements, Wiley, (1974) 61.
- [ 21 ] R. W. Marks, The Dymaxion World of Buckminster Fuller, Reinhold, (1960).
- [ 22 ] D. L. D. Caspar and A. Klug, *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.*, 27(1962), 1.
- [ 23 ] M. Brückner, Vielecke und Vielfache, Teubner, (1900).
- [ 24 ] L. Lines, Solid Geometry, Dover, (1965).
- [ 25 ] H. S. M. Coexter, Introduction to Geometry, Wiley, (1965).
- [ 26 ] H. S. M. Coexter, Regular Polytopes, Dover, (1973).
- [ 27 ] A. Pugh, Polyhedra, A Visual Approach, Univ. Calif., (1976).
- [ 28 ] P. Pearce and S. Pearce, Polyhedra Primer, Nostrand, (1978).
- [ 29 ] H. M. Cundy and A. P. Rollet, Mathematical Models, Oxford Univ. Press, (1961).

## 有机光电磁功能材料\*

刘云圻 刘升高 朱道本

(中国科学院化学研究所,北京 100080)

**摘 要** 有机光电磁功能材料是新一代材料.文章简要介绍了有机半导体、光导体、光致变色与电致变色材料、有机非线性光学材料、有机导体、超导体、导电高分子,以及有机铁磁材料和有机分子电子器件.

**关键词** 有机固体,功能材料,分子器件

**Abstract** Organic photo-electro-magnetic functional materials are a new generation of materials. A brief review is presented of organic semiconductors, photoconductors, photoluminescent and electroluminescent materials, organic non-linear optical materials, or-

\* 1995年5月18日收到初稿,1995年6月30日收到修改稿.

ganic conductors, superconductors, conductive polymers, organic ferrromagnetic materials and organic molecular electronic devices.

**Key words** organic solids, functional materials, molecular devices

材料是人类进行生产斗争和赖以生存的物质基础。在人类社会的发展过程中,材料往往作为划分时代的依据。当代,随着各项高技术发展的需要大大促进了材料的变革与发展。因此,功能材料、先进材料、杂化材料<sup>[1,2]</sup>、人工智能材料、纳米材料<sup>[3]</sup>、分子材料<sup>[4]</sup>等的开拓与研究也就应运而生了。

材料按其性能特征和用途大致可划分为结构材料和功能材料两大类。功能材料虽然种类繁多,功能各异,但其共同的特点和发展趋势是:(1)性能优异;(2)分子化;(3)巨大的应用前景。有机光电磁功能材料综合了这几方面特点,将发展成为新一代材料。

有机光电磁功能材料之所以越来越受到人们的重视,主要有两个背景:(1)以无机半导体晶体为材料基础的固体电子学经历了40多年的发展,已使微电子元件的尺寸降到了微米和亚微米量级,再要进一步提高集成度遇到了一些困难。为此,科学家们提出了在一个有机分子区域内实现对电子运动的控制,使分子聚集体构成有特殊功能的器件,从而开辟一条进一步提高集成度的新途径。这类器件很可能成为21世纪的新型器件。(2)有机固体的电子性质、导电机理及杂质影响不同于传统的无机半导体,揭示化学结构与物理性能之间的关系,尤其是一些特殊的物理性能,以及模型器件的制备、完善和提高等研究不仅具有重要的科学意义,而且蕴藏着巨大的应用前景。目前,通过科学家们的不断积累,已总结出如下一些简单的对应关系:有机固态光化学反应—光信息储存;固态反应—化学传感器;有机铁磁性—磁、磁光记录;液晶现象—电子显示;电光、非线性光学效应—倍频器、调制器、集成光学及光计算机;有机超导性—约瑟夫森结、计算机逻辑门、强磁体、超导体及电能输送;金属电导等特性—电子器件、塑料电池;有机光导和有机半导体—光

记录及太阳能电池;压电现象—换能器、传感器。在深入研究这些对应关系的基础上,进行新的分子设计、聚集态及器件设计,从而开发出目前无机电子材料所无法比拟的新一代有机光电磁功能材料。下面将就有机光电磁功能材料研究情况分类作一简单介绍与评述。

## 1 有机半导体与有机光导体

有机半导体已有40多年发展历史,人们制备了不少有机半导体,并对其电导、光导和其他物理性能及结构进行详细研究。虽然固体能带理论和晶格动力学已对无机半导体材料的研究和应用探索等方面起了指导作用,并已被实践证明是十分成功的,但在解释有机半导体和光导现象上仍有许多不适用的地方,主要原因是有机固体在化学上和结构上往往较复杂。所以有机半导体理论还有待进一步发展。在为数众多的有机分子电子学材料中,有机光导材料是仅有的几个实现产业化的材料之一。自从1970年美国IBM公司首先在复印机中使用有机光导材料、聚乙烯吡啶/三硝基苄酮(PVK/TNF)的感光鼓以来,有机光导材料的应用研究取得了飞速的发展,已研制出大量无公害、高性能的有机光导材料。由于有机光导材料资源丰富、成膜工艺简单和成本低等优点,据报道,每年全世界生产的400万台复印机中,采用有机光导材料的占70%以上。另外由于目前尚未发现对激光二极管所发激光(波长780nm)敏感的、实用化的无机光导材料,所以国际上每年生产的1200万台激光打印机和彩色激光复印机中几乎全部采用了有机光导材料。这些有机光导材料可分为四大类<sup>[5]</sup>:多偶氮颜料<sup>[6]</sup>,多芳烃和胺<sup>[7,8]</sup>,吡酮二胺,蒽酮等。染料则有噻喃鎓盐<sup>[9]</sup>,方酸盐和酞菁<sup>[10,11]</sup>等,图1是这些有机光导材料中一些有代表性的化合物的分子结

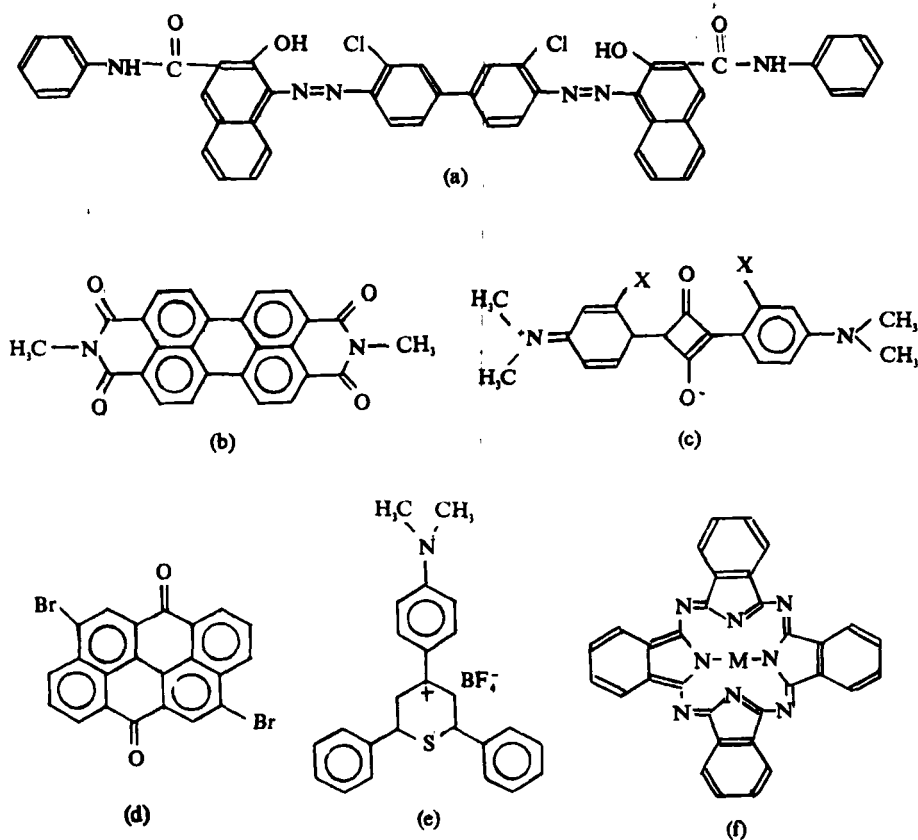


图1 典型的有机光导材料  
 (a) 双偶氮化合物; (b) 苝; (c) 方酸盐; (d) 酞菁盐;  
 (e) 溴代二苯并[cd,ji]苝-5,10-二酮; (f) 酞菁

构式。

## 2 光致变色和电致发光材料

1956年, Y. Hirshberg 首先提出光致变色反应可用于光信息存储和光记录材料。光致变色材料具有分辨率高、存储量大、其成色和消色过程可逆, 响应时间可慢可快, 因此既可以作为存储材料, 又可作为光开关材料。在有机光致变色材料中, 俘精酸酐, 螺吡喃, 二芳基乙烯, 席夫碱, 苯氧基萘并萘醌等衍生物及电荷转移化合物被研究得比较多。模型器件, 如一次性光盘, 可擦重写性光盘的制备与性能研究也已见报道。

对于光致变色材料在可擦重写光盘中的应

用来说, 还必须满足响应速度、擦写耐久性、非破坏性读出、热和环境稳定性, 以及合适的信息写入、读出和擦洗光波长等方面的要求。目前研究中的光致变色材料的综合指标与这些要求尚有很大的差距。

自从 1987 年美国柯达公司的 C. W. Tang<sup>[12]</sup>发表了高效、高亮度的小分子有机薄膜双层结构发光器件以来, 有机薄膜电致发光器件便成为当前发光器件研究的热点。和无机材料发光器件相比, 有机薄膜器件具有以下特点: (1) 直流驱动且驱动电压低; (2) 高效、高亮度; (3) 成膜容易; (4) 易于制成大屏幕平板显示; (5) 易于实现彩色化, 尤其对于无机材料难以实现的蓝色发光, 这是由于许多有机材料的带隙比无机材料的大, 因而很容易实现。

但小分子有机薄膜的稳定性差,器件工作时产生的热量使有机材料重结晶而使器件的性能下降. 1990年剑桥大学卡文迪什实验室的Burroughes等人<sup>[13]</sup>以聚(苯撑乙烯)(PVC)为发光材料制成了聚合物发光器件,引起了科技界的浓厚兴趣,从而开辟了发光器件的一个新领域——聚合物薄膜电致发光器件. 由于聚合物具有很好的电、热稳定性及成膜和机械加工性能,发光波长可以在合成过程中进行化学调节,从而可以实现各种颜色的发光,尤其是蓝色发光,而且发光亮度和效率高. 另外,聚合物启动工作电压低,可与集成电路驱动相匹配,因此目前这一领域的研究非常活跃.

有机薄膜电致发光器件的发光层可以是小

分子有机物或大分子量的聚合物. 作为发光层必须具有下列特性:(1)高量子效率的荧光特性,荧光光谱主要分布在400-700nm的可见光区域内;(2)具有较高的电导率;(3)成膜性能好,在几百nm甚至几十nm的薄层中无针孔;(4)材料稳定,良好的机械加工性能;(5)对于聚合物而言,要求共轭链足够长,纯度高.

目前研究得比较多的有机发光材料有,三唑衍生物,噁二唑衍生物,四苯丁二烯,三苯胺衍生物,聚(苯撑乙烯)及其衍生物,聚(乙烯咔唑)及其衍生物,聚(3-烷基噻吩)及其衍生物,和8-羟基喹啉铝等. 图2列出了一些典型化合物的结构式.

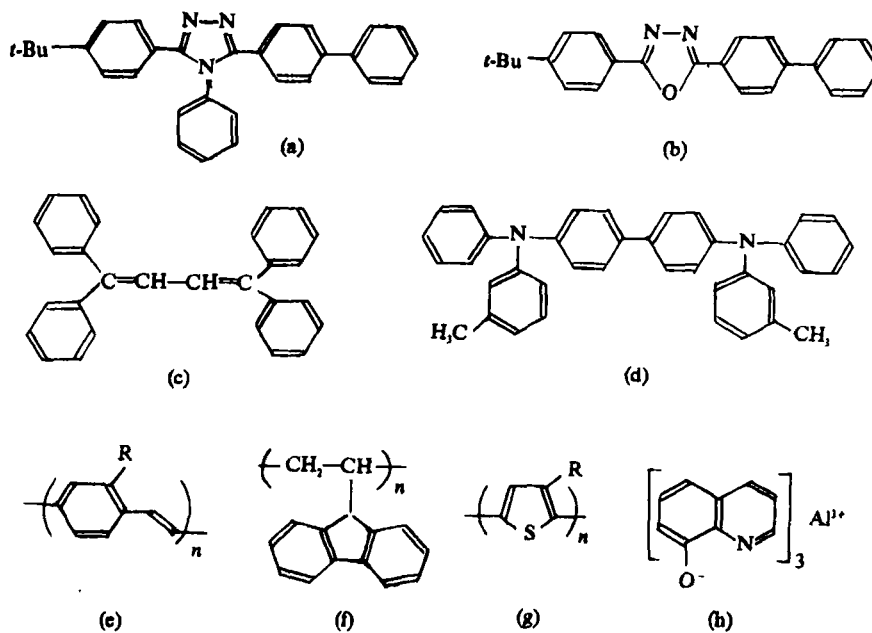


图2 一些典型的发光材料的化学结构式

(a)三唑衍生物; (b)噁二唑衍生物; (c)四苯基丁二烯;  
(d)三苯基胺衍生物; (e) 聚(苯撑乙烯); (f)聚乙烯咔唑; (g)聚噻吩; (h)8-羟基喹啉铝

虽然有机发光材料及器件发展非常迅速,但还存在一些问题. 如:材料的量子效率比较低;器件的稳定性差;寿命短;发光机理还不很清楚等. 今后的主要发展方向是:设计新的发

光材料,探索发光机理,进一步提高发光亮度和效率,改善器件稳定性,延长器件的寿命,开发有商业化前景的器件.

### 3 有机非线性光学材料

非线性光学材料是未来迈向信息时代的关键性材料. 利用光子作为信息存储、传输及处理的所谓光子学比目前利用电子做类似工作的电子学具有明显的优点. 而光子学的发展则依赖非线性光学材料的进展. 随着激光与激光技

术的飞速发展, 作为光电子学基础的非线性光学的研究也取得了巨大的进展. 光信息记录密度与入射光频率的平方成正比, 倍频激光可使信息存储容量大幅度增加; 利用各种非线性光学现象可以构成诸如混频、调制、开关、逻辑、存储和限幅等一系列光计算和光信息处理的关键元件. 光学元件还具有高速、宽频带、不受电场或磁场的干扰等特点.

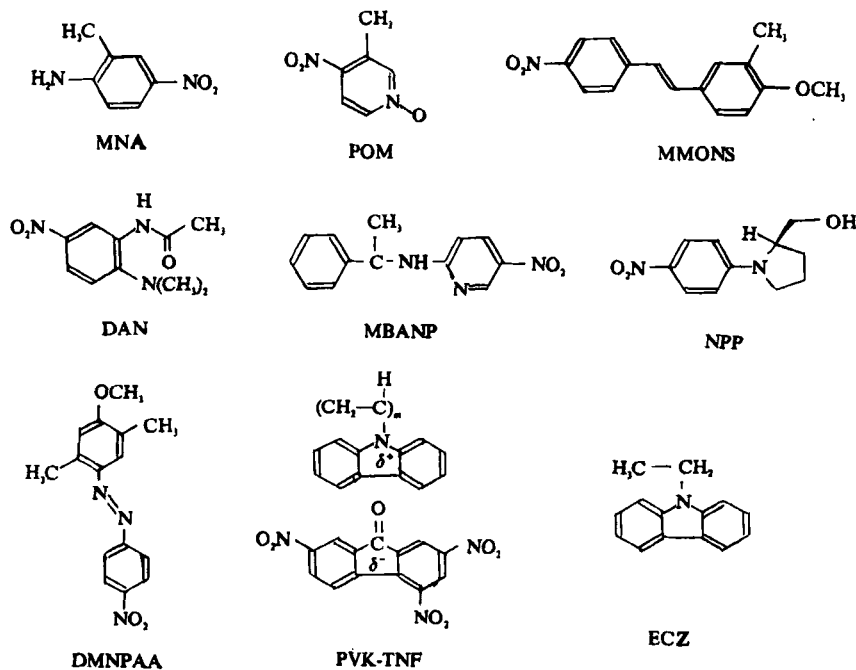


图3 有机晶体非线性光学材料与光折变聚合物

一般而言, 非线性光学材料需要具备的条件为: (1)非线性光学系数大; (2)能实现相位匹配; (3)低吸收, 透明波段宽; (4)抗光损伤能力强; (5)物理化学性质稳定, 硬度高, 不潮解; (6)容易生长大尺寸和高光学质量的晶体. 与无机非线性光学单晶相比, 有机材料具有非线性系数大、响应速度快、光学损伤阈值高等优点, 而且有机材料又具有设计弹性大、容易加工成型、便于应用于器件等优势, 因此潜力巨大而成为近期研究的热点. 目前研究的有机非线性光学材料可分为三类: 有机晶体、聚合物和 LB 膜.

有机晶体从化学结构来分有五种: (1)尿素及其衍生物; (2)间二聚代苯的衍生物; (3)芳香硝基化合物; (4)有机盐; (5)聚二乙炔单晶. 图3是二阶非线性光学有机晶体一些实例. MNA 是最早被研究的典型非线性晶体, 它的二阶非线性光学系数  $d_{31}$  是无机晶体  $\text{LiNbO}_3$  的 5.8 倍. POM 是除了尿素外另一个已商业化的非线性有机晶体, 它可由溶液中长成  $1\text{cm}^3$  的晶体, 并且拥有高度的透明性和相位匹配. 而 MBANP 不但晶体大而且光学质量极佳, 它的  $d_{22}$  为石英单晶  $d_{11}$  的 69 倍. 高分子非线性光学材料主要

有三种形态. 第一种是将非线性光学染料分子分散于高分子的基质中; 第二种是将染料分子以合成的方式接于高分子的主链或侧链上; 第三种则是将染料固定在交联的高分子基质中. 这几种形态的高分子因染料发色基团较无规则地排列, 所以必须经过电场极化, 使其偶极矩排列在同一方向, 才能有较大的  $\beta$  值. LB 膜是十分具有潜力的非线性光学材料, 它的最大特点是可以按照人们的需要进行设计, 把分子组装成有序排列的薄膜, 并利用成膜方式的不同形成非中心对称结构. 1992 年 Taniguchi<sup>[14]</sup> 将吡嗪衍生物与二十烷酸利用交替膜技术, 制备了二阶谐波强度与  $\text{LiNbO}_3$  相当的多层膜.

有机非线性光学材料的另一重要进展是光折变聚合物, 1994 年美国“科学新闻”杂志将其评选为当年国际上光电子材料的重大进展之一. 光折变材料在高密度光数据存储、全息图像加工、相共轭、神经网络、协同记忆的模拟和程序化互连等一系列光电子技术中具有潜在的应用前景. 在光折变聚合物的研究中, 最杰出的工作是美国和法国科学家联合研制了一种成本低而效率高的高分子复合物. 他们将有机光导体聚乙炔吡啶, 可见光光敏剂三硝基茚酮, 电光生色团, 2, 5-二甲基-4-(对硝基苯偶氮) 茴香醚(DMNPA) 及降低玻璃化转变温度的 N-乙基吡啶(ECZ), 按一定比例(DMNPA: PVK: ECZ: TNF = 50: 33: 16: 1, 重量百分数) 制成复合物薄膜. 这些化合物的结构如图 3 所示. 其衍射效率接近 100%, 净双光束耦合增益大于  $200\text{cm}^{-1}$ .

#### 4 有机导体、超导体与导电高分子

自 1973 年 D. O. Cowan, J. P. Ferraris, A. J. Heeger 和 A. F. Garti 发现有机晶体 TTF-TCNQ 具有金属电导性以来, 有机导体的研究得到飞速发展. 这类有机导体都属于电荷转移复合物类型, 给体分子和受体分子在晶体中分别面对面紧密有序堆砌, 沿着  $\pi$  电子重叠方向有类似金属的电导. 由于  $\pi$  电子层相互交叠的

各向异性导致了一维的物理特性, 所以存在理论物理上所认为的失稳性. 对 Peilers 相变、电荷密度波(C. D. W)、自旋密度波(S. D. W) 的深入研究不仅丰富了人们对低维材料的认识, 而且为探索有机超导体打下了基础, 另外在诸如电开关、温度显示和光盘等方面的研究已有一定的进展.

1980 年有机超导体  $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$  的出现震动了整个科技界, 结束了多年来关于有机超导体是否存在的争论. 短短十几年, 有机超导体的最高临界温度已超过 12K. 近几年,  $\text{C}_{60}$  经掺杂, 超导临界温度已达 33K. 由于有机超导体既有与高温超导体相似的物理性质又具有氧化物超导体所没有的特性, 其记忆和信息处理的可能性引起了广大科学家们的极大兴趣和注意. 新的有机导体的设计、合成及有关低温物理特性的研究及应用探索, 提高有机超导体临界温度, 试探高聚物超导体和室温超导体的可能性等仍是有机导体、超导体今后的研究方向.

1977 年, A. G. MacDiarmid, A. J. Heeger 和 H. Shirakawa 发现掺杂的聚乙炔具有金属特性, 从此导电聚合物受到了各国科学家、产业界和政府的高度重视. 1987 年 H. Naarmann 首先研制了碘掺杂的高度取向的聚乙炔, 使其室温电导率高达  $1.5 \times 10^5 \text{S/cm}$ , 其电导值可与铜相比拟而重量却只有铜的 1/12. 随后, 以聚吡咯、聚噻吩及聚苯胺为代表的聚芳烃、聚杂环的导电聚合物相继问世, 它们的电导虽然不如聚乙炔高, 但因有很好的稳定性, 更接近应用而格外受重视. 导电高聚物除了导电性之外, 还呈现了电致变色、高的三阶非线性光学系数等特性, 所以在能源、能量转移、通讯、信息处理能以及隐身技术上展现了广阔的应用前景.

#### 5 有机铁磁性材料

众所周知, 铁磁性材料多为具有 3d 或 4f 轨道的过渡金属、合金、矿物等无机材料, 而有机分子因具有闭壳层的电子结构而呈抗磁性. 然而早在 1963 年 H. M. McConnell 就预言有机

化合物有可能具有铁磁性,并提出了相应的理论模型. 1986年 A. A. Ovchinnikov 首次在实验室合成出第一个有机铁磁性聚合物,从而奠定了一个新兴学科——有机铁磁体的诞生.

有机铁磁体可分为分子晶体、聚合物、电荷转移复合物和金属有机络合物四大类(见图4). 日本科学家 Awaga 等人发现了有较强宏观铁磁性的小分子自由基有机化合物,如醌类自由基(galvinoxyl)和氮氧自由基(NTDIO) [NTDIO: 2-(4-nitrophenyl)-4,4,5,5-tetramethyl-4,5-dihydro-1H-imidazolyl-3-oxide]. 聚合物铁磁体中研究得最多的是侧链为氮氧自由基的聚合

物. 典型的电荷转移复合物铁磁体是二茂铁  $[\text{Fe}(\text{C}_5\text{Me}_5)_2]$  与电子受体 TCNQ 组成的电荷转移复合物. 尤其是最近  $\text{C}_{60}$  电荷转移复合物铁磁性研究,国内外都有很大进展. 席夫碱基金属有机聚合物  $[\text{Fe}(\text{C}_{13}\text{H}_{17}\text{N}_5) \cdot \text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]_n$  是铁磁性的金属有机络合物的代表之一. 值得指出的是,我国四川师范大学“金属有机高分子磁性体研究”课题组. 在结构型金属有机高分子磁性材料的研究方面取得了重大突破,合成出一种新型的高分子磁性化合物,而用这种磁性化合物制成的元器件可望在一系列新的通讯设备中获得应用.

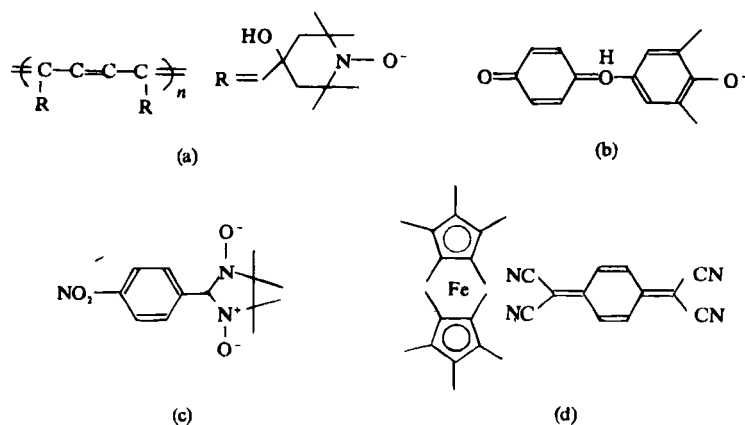


图4 有机铁磁体分子结构

- (a) 侧链为氮氧自由基的聚合物;
- (b) 醌类自由基;
- (c) 氮氧自由基;
- (d) 二茂铁与电子受体组成的电荷转移复合物

总而言之,由于当代高技术发展的需要,铁磁体作为信息记录、存储材料越来越重要,而有机材料质轻、易加工,很多方面迫切需要以有机铁磁材料代替无机铁磁材料. 十几年来,科学家们试图设计、合成出稳定性好、磁含量高、铁磁转变温度高和具有较高矫顽力的有机铁磁体,取得了一些可喜的成果. 今后科学工作者将按照各自的设计思想,合成出一系列新的化合物来观察宏观铁磁性和微观电子自旋的相互作用,并对目前有争议的体系进行深入细致的研究,以探索其内在的本质规律和机理,有关理论还有待今后实验结果的不断积累而逐步建立

和完善.

## 6 有机分子电子器件

分子器件的目标是采用有机和导电聚合物、电荷转移复合物、有机金属和其它分子材料开创出用于信息和微电子学的新型元件,它的研究内容主要包括:分子导线、分子开关、分子整流器、分子存储器和分子计算机等. 这些分子层次上的器件通常称作为狭义分子器件或分子器件. 除此之外,以有机分子为材料,通过分子层次的成膜技术,如 LB 膜技术、有机分子束

外延生长技术所制备的光电子器件,这些器件本身并没有达到分子层次,所以通常称作为广义分子器件或有机分子器件.

有效的分子导线是实现分子电子器件的关键单元. 作为分子导线必须满足下述条件:(1)导电;(2)有一个确定的长度,足以跨越诸如类脂单层或双层膜;(3)含有能够联接到系统功能单元的连接端点;(4)允许在其连接端点进行氧化还原反应;(5)导线必须与周围绝缘以阻止电子的任意传输. 1988年 L. L. Miller<sup>[15]</sup>等人首先在分子导线研究方面取得鼓舞人心的进展,他们以双二烯为原料,通过狄尔斯-阿德尔加成反应和芳构化反应,分别合成了长度为 3.06, 5.28 和 7.50nm 的线性分子导线. 1991年 M. J. Crossley<sup>[16]</sup>等人由双卟啉四酮合成准一维,全共轭的卟啉齐聚体,长度约为 6.5nm,主链周围有特丁基作为护套,以保证共轭中心与周围绝缘. 基本上符合上述对分子导线的要求.

分子导线中信息载流子除电子或空穴外还可能是孤立子、极化子、双极化子和光子等. 最近 J. S. Lindsey<sup>[17]</sup>等人设计合成了分子光子导线,与分子电子导线不同,分子光子导线支持激发态能量的输运而不是电子(或空穴)的输运过程.

1993年9月29日美国《研究与发展内情》报道了美国阿贡国家实验室的 M. R. Wasielewski 等研制成功一种可靠性强的快速分子开关. 其开关速度是其他分子开关的 10至 100倍. 而且在一天内进行了 8600 万次开关检查,没有发现失灵. 原因是这种分子开关在工作时结构不发生变化. 相比之下,其他分子开关则是依靠化学键的形成和分裂来进行工作的,因此开关速度慢、可行性差. 这种分子开关,中间是一个受体(苝),两端是给体(卟啉). 在开关过程中,给体发射电子,受体接受电子. 当用一低强度的近红外光(713nm)照射分子开关时,一个给体发射一个电子给受体;当用一高强度的黄绿光(546nm)照射分子开关时,两个给体发射电子. M. R. Wasielewski 等认为这种

分子开关的出现将大大推动光计算机、电子器件及光通信装置朝着小型化、高效率、高速度方向发展. 他们指出,这种分子开关将在 3至 5年内投入应用. 但是至今没有见到这种分子开关的详细报道.

与此相反, R. A. Bissell<sup>[18]</sup>等人则较为详细地报道了他们研究的可逆分子开关. 这种分子开关为串珠样的超分子结构,可因 pH 值变化或电化学氧化还原在两种状态之间可逆地转换.

无论是理论准备还是实验制备,分子整流器是研究得最多的分子器件. 其中最为杰出的成果是 G. J. Ashwell<sup>[19]</sup>等人利用 LB 膜技术,以有机材料做成只有几个分子厚的薄层能像整流器那样,只允许电流沿一个方向流动. 并从实验上证明这种整流性能的本质是来源于分子的作用. 为此英国的 New Scientist<sup>[20]</sup>和美国的 Science<sup>[21]</sup>都迅速地介绍了该项成果.

然而分子存储器和分子计算机主要仍限于理论上的探讨,实验结果报道还很少. 据来自各方面的消息,分子存储器的研制工作已在一些著名实验室中秘密地进行着. 贝尔和 Naval 实验室的科学家们自称他们的研究成果可使存储密度达到  $10^{10}$  bit/cm<sup>2</sup>.

如果说狭义分子器件的研究至今仍是凤毛麟角的话,那么广义分子器件则是雨后春笋,遍地开花了. 如光电开关、肖特基二极管、发光二极管、场效应晶体管、电照相接收器、太阳能电池、固体电容、可冲电池、光波导和气体传感器等等. 其中有一些已进入应用基础或应用开发研究,本文不再赘述.

总之,有机光电磁功能材料不是作为现有无机材料的代用品或者其延伸,而是它将成为无机材料所不可替代的新一代材料. 与结构材料不同,功能材料的功能往往是通过器件实现的. 今后,首先要深入研究材料的结构与功能的关系,同时大力开展有机分子和聚集态设计及制备,在此基础上,逐步加强器件设计和研究,开发出新一代分子材料和器件.



## 参 考 文 献

- [ 1 ] 廖国成, 化学通报, 12(1984), 26.
- [ 2 ] 刘云圻, 大学化学, 2(1987), 8.
- [ 3 ] 朱星, 物理, 20(1991), 203.
- [ 4 ] 朱道本, 中国科学基金, 3(1994), 201.
- [ 5 ] D. M. Pai and A. R. Melnyk, 感光科学与光化学, 9 (1991), 198.
- [ 6 ] K. C. Nguyen and D. S. Weiss, *Electrophotography*, 27 (1988), 2.
- [ 7 ] Z. Popovic, R. O. Loutfy and A. M. Hor, *Can. J. Chem.*, 63(1985), 134.
- [ 8 ] P. M. Borsenberger, T. M. Regan and W. T. Standenmeyer, U. S. Pat., (1985), 4, 578, 334 and 4, 618, 560.
- [ 9 ] W. A. Light, U. S. Pat., (1971), 3, 615, 414.
- [ 10 ] C. H. Griffiths, M. S. Walker and P. Goldstein, *Mol. Cryst and Liq. Cryst*, 33(1976), 149.
- [ 11 ] K. Arishima, H. Hiratsuka, A. Tate et al., *Appl. Phys. Lett.*, 40(1980), 279.
- [ 12 ] C. W. Tang and S. A. Van Slyke, *Appl. Phys. Lett.*, 51 (1987), 913.
- [ 13 ] J. H. Burroughes, D. D. C. Bradley, A. R. Brown et al., *Nature*, 347(1990), 539.
- [ 14 ] M. Era, H. Kawafuji, T. Tsutsui et al., *Thin Solid Fioens*, 210/211(1992), 163.
- [ 15 ] P. W. Kenny, L. L. Miller, *J. Chem. Soc. :D.*, (1988), 84.
- [ 16 ] M. J. Crossley and P. L. Burn, *J. Chem. Soc. : Chem. Commun.*, No. 21(1991), 1569.
- [ 17 ] R. W. Wagner and J. S. Lindsey, *J. Am. Chem. Soc.*, 116(1994), 9759.
- [ 18 ] R. A. Bissell, E. Cordova, A. E. Kaifer et al., *Nature*, 369(1994), 133.
- [ 19 ] A. S. Martin, J. R. Sambles, G. J. Aashwell, *Phys. Rev. Lett.*, 70(1993), 218.
- [ 20 ] D. Clery, *New Scientist*, 137(1993), 21.
- [ 21 ] D. H. Waldeck and D. H. Beratan, *Science*, 261(1993), 576.

## 半导体中的输运过程\*

夏 建 白

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘 要** 半导体的输运性质直接决定了半导体器件的性能, 如响应时间、截止频率等, 因此与半导体器件发展的同时, 人们对半导体的输运性质进行了广泛的实验和理论研究. 文章根据半导体物理的发展历史, 分体半导体输运、调制掺杂杂质结输运、超晶格微带输运、弹道输运以及介观系统输运等几个方面来讨论这一问题.

**关键词** 半导体, 输运, 超晶格, 介观系统

**Abstract** The transport properties of semiconductors decide directly the performance of semiconductor devices, for instance, their response time, cut-off frequency, etc. Hence, in the history of device development, transport properties have been studied widely both experimentally and theoretically with regard to the historical development of semiconductor physics, this paper will discuss transport in bulk semiconductors and modulated doped heterojunctions, miniband transport in superlattices, ballistic transport, and transport in mesoscopic systems.

**Key words** semiconductor, transport, superlattice, mesoscopic system

\* 国家自然科学基金资助项目.

1995年5月30日收到初稿, 1995年10月10日收到修改稿.