

有机物的电磁学性质

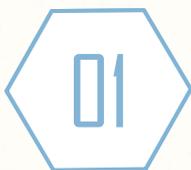
电磁学课后对于有机物电学性质的思考和总结

答辩人：王子洋

指导教师：余庆选

目 录

- 1 由导电高分子引起发的思考
- 2 有机导体与半导体
- 3 有机超导体
- 4 参考及致谢



导电的高分子

Conducting Polymer



导电的高分子

一直以来，高聚物都被认作是良好的绝缘体；其介电常数 ϵ 满足：

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}$$

其物理意义在于判断高聚物电容器储电能力的大小，在分子角度上则是高聚物分子的极化能力的强弱，现在我们就有两个分析高聚物极化能力的参数，宏观介电常数 ϵ 和微观分子极化率 α 。其关系满足Clausius-Mossotti方程：

$$\frac{\epsilon_0 - 1}{\epsilon_0 + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{4}{3} \pi \tilde{N} \alpha = P$$

式中， ϵ_0 为直流电场中的静电介电常数， M 为高聚物的相对分子质量； ρ 为密度， N 为阿伏伽德罗常数； P 为摩尔极化度； α 为分子极化率， $\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_0$ ， α_e 为电子极化率， α_a 为原子极化率。

 **导电的高分子**

下图为绝缘高分子极化示意图

无电场时 分子无规则排布 加上电场后被极化 在极短的时间内完成极化

极化的四种方式

电子极化 离子极化 原子极化 偶极极化

 **导电的高分子**

但是到了1970s, Shirakawa实验室的一名研究生使用了一千倍于正常值的Ziegler-Natta催化剂, 合成了具有金属光泽的聚乙炔膜, 但是刚刚合成的聚乙炔膜并不具有优异的导电性, 而是表现出特别的半导体特性, 而后, 对其进行像增强半导体导电性的处理即掺杂, 发现少量的掺杂只能很少的提升导电性, 但是当掺杂达到百分之一数量级时, 却具有和Cu一样数量级的导电性。



反式聚乙炔

起初我们预测有机导体一定是来源于 π 体系的共轭。我们首先用一维势箱来解释:

根据一维的Schrödinger方程:

$$\frac{\hbar^2}{8m\pi^2} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) = E\psi(x),$$

其中 $\psi(x)$ 为一个波函数, 令 $\omega^2 = \frac{\hbar^2}{8\pi^2 m}$, 则有:

$$\psi(x) = A\cos\omega x + B\sin\omega x$$

$$E_n = \frac{n^2 \hbar^2}{8ma^2}, \quad (1)$$

a为势箱长度, \hbar 为普朗克常量, n为主量子数

一点小思考: 为什么用一千倍量的催化剂?



导电的高分子

$$\psi(x) = A \cos \omega x + B \sin \omega x \quad E_n = \frac{n^2 h^2}{8ma^2}$$

设d为烯烃体系碳碳键的平均长度，当共轭达到一定的数量值之后，我们可以近似的认为键长等长，C-C为0.154nm，C=C键长为0.134nm，d的估值为0.140nm。基态时，前n个轨道被填满，若想导电，则有以下形式：



A与B相互转化，并且呈镜面对称，且我们知道：

$$E_{n+1} - E_n = \frac{h^2(2n+1)}{32m d^2 n^2} \quad (2)$$

当n越大时，电子跃迁能量越低。但是载流子并不是单一电子，我们以A-B的转化来计算。

取n=10000，载流子个数为x

$$\Delta E = x \times \frac{(6.626 \times 10^{-34})^2 \times 20001}{32 \times 9.1 \times 10^{-31} \times (1.4 \times 10^{-10})^2 \times (10^4)^2} \times \frac{1}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.00096 \text{ eV}$$

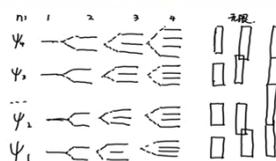
常见无机半导体的禁带宽度从0.1~2.0eV，说明反式聚乙炔链的导电性还是可以的，而真实的电导率的测量^[4]值为200-1000，小于我们的推算。



导电的高分子

事实上，在多维的共轭体系中，势箱模型已不再适用，我们应用Huckel的分子轨道理论（HMO）来考虑无限线性多烯的情况。在刚才的模型中，我们认为聚合物的键长等长，并且没有对顺式和反式的导电性有贴切的解释。

HMO法在化学中被称为分子轨道法，在凝聚态物理中则被称为紧束缚法，右图示意：



其中的 ψ_i 为第i组内的有同相位组成的轨道，同相位轨道的能量低于异相位的能量，相差不多，当n不断增大，同相位与异相位的轨道的能量的差值都在降低。由于聚乙炔可以被视为丁二烯片段的加和，我们可以认为，参与聚合的丁二烯轨道越多，每组轨道覆盖的能级也在增大，直至相互重叠。



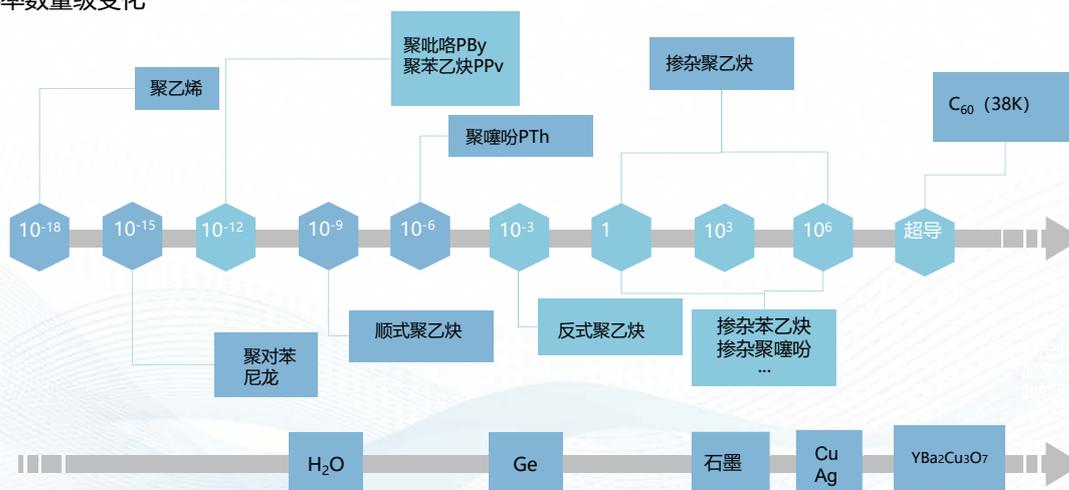
02

有机导体与半导体

Organic conductors and Semiconductors

导电的高分子

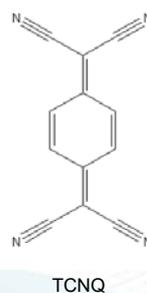
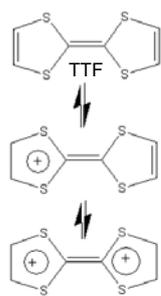
电导率数量级变化





导电的高分子

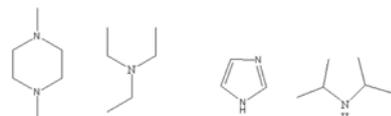
另一个要提的就是复合电荷转移复合物，由富电子的四硫化富瓦烯(TTF)和吸电子的7, 7', 8, 8'-四氰代对二次甲基苯醌(TCNQ)组合而成的化合物对是典型的电子转移复合物，下图为TTF作为 π -给予体类似的可逆氧化。



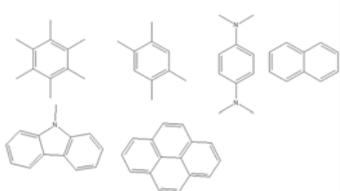
导电的高分子

除了刚才的那一对复合物，还有许多种搭配，电子给予体分为 n 型和 π 型给体，受体主要为 π 型受体，包括多硝基芳香化合物、醌类、以及芳香氰类等

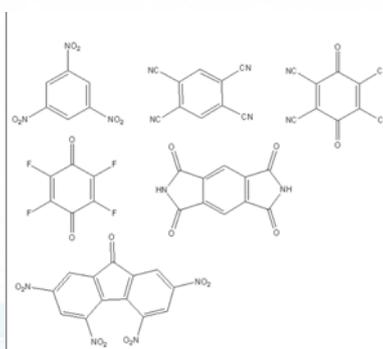
n -doner



π -doner



π -acceptor





导电的高聚物

导电高聚物在四十多年的探索中，并没有在导电和半导上取得过多的工业化应用，反而却歪打正着了在电致发光领域的突破，我们也可以从分子轨道理论来理解， σ 轨道的电子是基态的，吸收能量就会进入 π 轨道，当然还有多种形式，鉴于篇幅和个人能力原因，以后在有机半导体处讨论。

接下来我们趁着刚刚讨论过的能带和一维势箱对其拓展，一维聚乙烯提升一个维度即成石墨烯和碳纳米管。

金属性的碳纳米管的迁移率很难定义，我们近似计算，一维情况下，最大电导是量子化的，计算电导率和迁移率。

$$\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2m\bar{v}} \quad \text{和} \quad j = neu$$

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{ne^2\tau}{m^*}$$

τ 为动量散射率， m^* 为载流子的质量

一维情况下有：

$$\sigma = GL \quad G \text{为电导, } L \text{为样品尺寸。}$$

一维情况下，最大电导是量子化的，假设不存在散射，每个导电模式有：

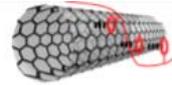
$$G_{\max} = \frac{e^2}{h}$$



导电的高聚物

对于碳纳米管，存在双能带和两种自旋态，因此：

$$G_{\max} = 4 \frac{e^2}{h}$$

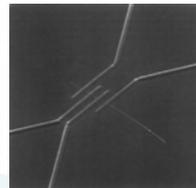


对于存在散射的不完整量子线，电导（忽略粒子干涉的影响）：

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{G_{\max}} + \frac{1}{G_{\text{wire}}}$$

$$G_{\text{wire}} = G_{\max} \frac{T}{1-T}$$

其中T为量子线的透射几率





导电的高聚物

在一维的体系中，我们定义平均自由程为 $T=\frac{1}{2}$ 时或者 $G_{wire}=G_{max}$ 时的量子线长度，有

$$\frac{l}{L} = \frac{G_{wire}}{G_{max}}$$

L 为势箱长度，这里为碳纳米管长度

迁移率与平均自由程的关系为：

$$\mu = G_{max} \frac{l}{ne}$$

可以据此来估计半导体碳纳米管的迁移率，也可以来解电导率

$$\sigma = \mu ne$$



导电的高聚物

我们取一个长度为 $3\mu\text{m}$ 直径为 4nm 的碳纳米管，我们还知道费米速度 $v=8.1 \times 10^5 \text{m/s}$ （由石墨布里渊区的K点的费米速度），根据

$$n = 4 \frac{k_F}{\pi} = \frac{8\sqrt{3}\Delta}{\pi h v_F} \quad E_g = \frac{0.7}{d}$$

$$nd=2.9$$

得到迁移率 $\mu = \frac{4e^2}{2.9h \times e} \times l \times d = 4.74 \text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 与测量值[1]相符。

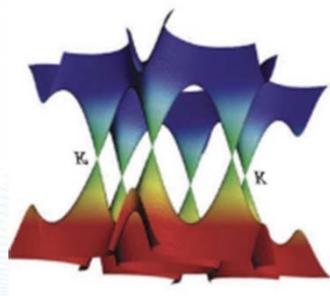
We recently proposed an alternative semiconducting material for such applications that consists of a two-dimensional random network of single-walled carbon nanotubes (SWNTs).³ Individual SWNTs are known to possess an extremely high electron mobility, $\mu > 10,000 \text{cm}^2/\text{Vs}$,⁴ operate at high frequencies $> 1 \text{GHz}$,^{5,6} and can be deposited from

1. Snow E S, Campbell P M, Ancona M G, et al. High-mobility carbon-nanotube thin-film transistors on a polymeric substrate[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(3): 033105.



导电的高聚物

单层石墨烯是零带隙的半导体，但是载流子质量为零！在每个布里渊区，导带和价带相交于两点K和K'，也就是所谓的狄拉克点。



导电的高聚物

在二维半导体中，自旋轨道耦合可以导致自旋霍尔效应，我们可以观察到一个垂直于电场方向的自旋流，这种效应已经在 GaAs 中观察到，并且 Murakami 等人已经论证了存在一种块状绝缘体，其中能够存在自旋电导。但是石墨烯中的量子霍尔效应不同，是一种与能带绝缘体有拓扑区分性的一种效应，标志了一类新的量子自旋霍尔绝缘体

在Matlab中我们直接模拟带状石墨烯的能带图，得到一下结果和结论：

```

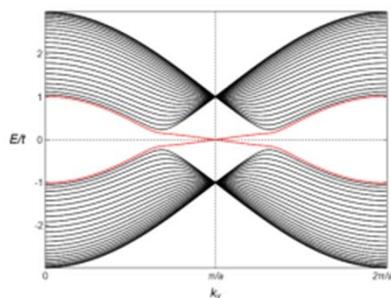
% 石墨烯能带结构的Matlab模拟
% 1. 定义晶格常数和布里渊区范围
a = 0.357; % 晶格常数 (nm)
% 2. 定义布里渊区范围
kx_max = pi/a;
ky_max = pi/a;
% 3. 定义布里渊区网格
nkx = 100;
nky = 100;
% 4. 定义布里渊区网格点
kx = linspace(-pi/a, pi/a, nkx);
ky = linspace(-pi/a, pi/a, nky);
% 5. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 6. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 7. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 8. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 9. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 10. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 11. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 12. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 13. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 14. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 15. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 16. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 17. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 18. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 19. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 20. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 21. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 22. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 23. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 24. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 25. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 26. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 27. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 28. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 29. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 30. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 31. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 32. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 33. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 34. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 35. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 36. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 37. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 38. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 39. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 40. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 41. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 42. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 43. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 44. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 45. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 46. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 47. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 48. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 49. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 50. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 51. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 52. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 53. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 54. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 55. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 56. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 57. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 58. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 59. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 60. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 61. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 62. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 63. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 64. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 65. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 66. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 67. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 68. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 69. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 70. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 71. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 72. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 73. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 74. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 75. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 76. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 77. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 78. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 79. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 80. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 81. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 82. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 83. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 84. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 85. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 86. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 87. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 88. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 89. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 90. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 91. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 92. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 93. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 94. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 95. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 96. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 97. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 98. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;
% 99. 定义布里渊区网格点索引
[xx, yy] = meshgrid(1:nkx, 1:nky);
% 100. 定义布里渊区网格点坐标
kx = kx - pi/a;
ky = ky - pi/a;

```

石墨烯能带的指导源自博士生师兄



导电的高聚物



带状无限长石墨烯的能谱图。能谱线的数量与所模拟石墨烯宽度(横向包含元胞的数目)有关,从图中可见存在两个能带,在 k_y 为 0 的时候,能带关闭,相关能级用红色线标出。从数据来看,红色线能量二重简并,共对应四个边界态;K 和 K' 处 bulk 的两个带隙,并且两个能带穿越带隙,将 K, K' 连在一起。这两个特殊的能带对应于边界态,并且均为二重简并。也就是说,在每个边界上,均存在两个自旋方向相反,传输方向相反的电子流。关于石墨烯的特性,限于水平与时间,暂且讨论至此。

03

有机超导体

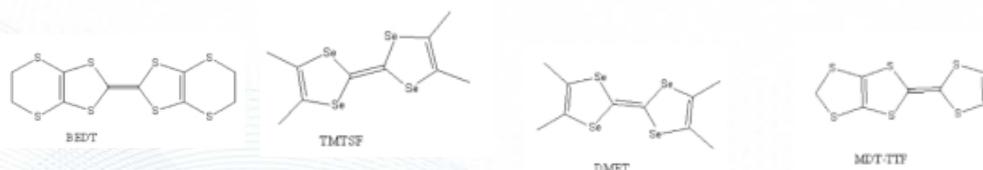
Organic Superconductors

有机超导并不是一个陌生的或者说是异想天开的概念,但是有着大量的复杂混淆的定义。芳香分子的抗磁性环电流如苯、萘、蒽等的无耗散的电流都是具有类似超导性质的,可惜分子的性质并不能代表宏观超导体的性质。第一类超导体中,BCS模型中的声子-电子对并不适用于有机物,那我们只好自己去寻找机制了

有机超导体

Little曾提出过有机超导理论和有机超导的模型，自从 $(\text{TMTSF})_2 \cdot \text{PF}_6$ ^[13]被合成并且被证明具有超导性能，结束了多年来的争论。（尽管最早的预测Tc是高于300K的）

下图为常见的有机超导体的阳离子前体



有机超导体

再后来，科学家们保持阳离子或阴离子不变通过替换阴离子合成一系列的有机单晶，下图为我自己搜罗的近三十年部分成果：

CTC	PF ₆ ⁻	Treatment	Pc/kbar	Tc/K
$(\text{TMTSF})_2 \cdot \text{PF}_6$ ^[13]		pressure	6.5	1.4
$(\text{TMTSF})_2 \cdot \text{AsF}_6$ ^[13]		pressure	9.5	1.4
$(\text{TMTSF})_2 \cdot \text{ClO}_4$ ^[13]				1.4
$(\text{TMTSF})_2 \cdot \text{SFO}_4$ ^[13]		pressure	5	3
$(\text{BEDT-TTF})_2 \cdot \text{AuI}_2$ ^[14]	β			4.2
$(\text{BEDT-TTF})_2 \cdot \text{Ag}(\text{CN})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ^[15]				5.0
$(\text{BEDT-TTF})_4 \cdot \text{Hg}_2 \text{Cl}_8$ ^[16]		pressure	12	1.8
$(\text{BEDT-TTF})_4 \cdot \text{Hg}_2 \text{Cl}_8$		pressure	29	5.3
$(\text{BEDT-TTF})_2 \cdot \text{IBr}_2$ ^[17]	β			2.5
$(\text{BEDT-TTF})_2 \cdot \text{Cu}[\text{NCN}]_2 \cdot \text{Cl}$ ^[18]		pressure	0.3	12.5
$(\text{BEDT-TTF})_2 \cdot \text{Cu}[\text{NCN}]_2 \cdot \text{Br}$				11.6(on set)
$(\text{DMET})_2 \cdot \text{Au}(\text{CN})_2$ ^{[19][24]}		pressure	1.5	0.9
$(\text{DMET})_2 \cdot \text{AuI}_2$ ^[20]		pressure	5	0.6
$(\text{DMET})_2 \cdot \text{AuCl}_2$ ^[20]				
$(\text{DMET})_2 \cdot \text{IBr}_2$ ^[20]				
$\text{TTF}[\text{Ni}(\text{dmit})_2]$ ^[21]		pressure	7	1.6
$(\text{CH}_3)_4\text{N}[\text{Ni}(\text{dmit})_2]$ ^[22]		pressure	7	5
$\text{TTF}[\text{Pd}(\text{dmit})_2]$ ^[22]	α	pressure	19	3.5
$(\text{MDT-TTF})_2 \cdot \text{AuI}_2$ ^[23]				

上图节选自我自己的论文



有机超导体

从上表可以发现，配体的不同以及电子给体的变化， T_c 也发生较大的变化，我们可以得知，不同键的取向以及氢键的形成，都会提升超导体的 T_c 。然而，Little在理论计算中，预测有机超导体的 T_c 可以高于室温，尽管这在目前是远远超出我们认知的，其实困在在于Little的激子机理目前在实验上无法证实（当然化学家合成水平还没有达到控制分子的水平），但是这一理论一直在指导人们为了实现高温超导而努力

当然还存在另一类超导体，尽管对于其是否是有机物的范畴仍有争论，这并不影响我们对他的研究，那便是石墨烯的超导性能，早在之前我们便提到过石墨烯等物质具有理论上的超导潜力，在2018年，这种超导被证实存在，虽然是处于极低温度（1.1K），但是是属于常压状态。

Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices

Yuan Cao¹, Valtia Fatemi¹, Shiang Fang², Kenji Watanabe³, Takashi Taniguchi³, Efthymios Kaxiras^{3,4} & Pablo Jarillo-Herrero¹

We observed superconductivity across multiple devices with slightly different twist angles, with the highest critical temperature that we achieved being 1.7 K.



有机超导体

寻找易于提供电子的电子给予体

寻找有机配体寻求超导，

也许掺杂了电子的低维材料少数层叠加会像双层石墨烯一样

层间结构更加有序，便于电子流通，或者通过有机物来制取更加有序的纳米材料 如七水合草酸铋（曾经的回忆）

机理都没有探求明白呢 干嘛着急应用

寻找方向

389

04

参考文献

Reference



参考文献

- [1]. 叶邦角 .(2000). 电磁学 (第二版), 中国科学技术大学出版社
- [2]. 麦松威, 周公度, 李伟基 .(2011). 高等无机结构化学(第2版), 北京大学出版社
- [3]. 解士杰, 尹笋, 高琨, (2017). 有机固体物理(第二版). 科学出版社
- [4]. Conductors O. From Charge Density Wave TTF-TCNQ to Superconducting (TMTSF) 2PF6 Jerome, Denis[J]. Chemical Reviews (Washington, DC, United States), 2004, 104(11): 5565-5591
- [5]. Cao Y, Fatemi V, Fang S, et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices[J]. Nature, 2018, 556(7699): 43.
- [6]. Snow E S, Campbell P M, Ancona M G, et al. High-mobility carbon-nanotube thin-film transistors on a polymeric substrate[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(3): 033105.
- [7]. Little W A. Possibility of synthesizing an organic superconductor[J]. Physical Review, 1964, 134(6A): A1416.
- [8]. Little W A. Possibility of Synthesizing an Organic Superconductor[M]// From High-Temperature Superconductivity to Microminiature Refrigeration. Springer, Boston, MA, 1996: 35-43.

本文化学结构式采用Chem.Draw绘画, 公式采用LaTeX和word结合, 文献引用采用GB/T 7714格式



致谢

感谢数院学长帮助我使用LaTeX和Matlab

同样感谢博士生师兄帮助找到石墨烯的论文

同样感谢余老师和助教学长给我这次答辩的机会



谢谢观赏

答辩人：王子洋