材料、器件与工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023051901

三种状态蒽的三重态吸收性质研究

周　庆[1,2]，陈昕昕[1,2]，谢俊涵[3]，张　力[1,2]，孙　静[1,2*]，王中阳[1,2*]

（1. 中国科学院上海高等研究院，上海 201210；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 上海科技大学 物质科学与技术学院，上海 201210）

摘　要： 利用瞬态吸收光谱技术研究了蒽在甲苯溶液和PMMA薄膜及晶体中的瞬态吸收过程，发现当激发波长375 nm处的吸收度为0.7时，溶液中蒽的三重态最大吸收信号强度为其在PMMA中的5倍，而在高吸收度的晶体中，三重态吸收较低。通过建立模型分析，PMMA中的蒽分子存在光场诱导下偶极矩的宏观统计极化，导致宏观极化偶极矩的降低，而处于甲苯溶液中的蒽分子则易被光场所极化，产生较大的极化偶极矩，这是引起三重态吸收信号差异的原因。在晶体状态下，S_1能级发生分裂，低于T_2能级，S_1-T_1能量差较大，系间窜越失效，抑制了三重态吸收。以上结果解释了蒽分子在不同状态下三重态最大吸收信号差异。

关键词： 蒽；三重态；瞬态吸收光谱；超快动力学

中图分类号： O411.3　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0863－06

Study on the Triplet State Absorption Properties of Three States of Anthracene

ZHOU Qing[1,2], CHEN Xinxin[1,2], XIE Junhan[3], ZHANG Li[1,2], SUN Jing[1,2], WANG Zhongyang[1,2]

(1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN;
3. School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, CHN)

Abstract: The transient absorption process of anthracene in toluene solution, PMMA film and crystal was studied by transient absorption spectroscopy. It was found that when the absorption was 0.7 at the excitation wavelength of 375 nm, the maximum absorption signal intensity of the triplet state of anthracene in solution was five times that in PMMA. In the crystal with high absorption, the triplet state absorption signal was lower. By establishing a model, it was found that the anthracene molecules in PMMA exhibited macroscopic statistical polarization of the induced dipole moment under the optical field, resulting in a decrease in macroscopic polarization dipole moments. On the other hand, the anthracene molecules in the toluene solution were easily polarized by the optical field, resulting in a larger polarized dipole moment. This is the reason for the difference in triplet state absorption signals. In the crystal state, the S_1 energy level splits and is lower than T_2. The energy gap between S_1 and T_1 is large, and the intersystem crossing is not effective, which inhibits the absorption of the triplet state. These results explain the difference in the maximum absorption signal of the triplet state of anthracene in different states.

Key words: anthracene; triplet; transient absorption spectrum; ultrafast dynamics

收稿日期：2023－05－19.

基金项目：上海市科学技术委员会项目(20DZ2210300).

* **通信作者：**孙　静，王中阳　**E-mail:** sunj@sari.ac.cn；wangzy@sari.ac.cn

0 引言

上转换技术可以将吸收的低能光子转化为高能光子发射，由于其光学独特性，在众多领域展现出广阔的应用前景。目前，上转化主要基于三重态-三重态湮灭、双光子吸收、二次谐波产生和激发态吸收等过程[1]。其中，基于三重态-三重态湮灭的上转换技术具有激发光能量低、波长可调谐等优势，近年来成为主要研究热点之一，已应用到光伏器件[2]、有机发光二极管(OLED)[3]、光催化[4]和生物成像[5]中。但由于受到光敏剂和受体分子的浓度以及分子所处环境等多种因素限制，经常导致其在溶液和固体中产生低于自旋统计参数所预期的转换效率[6]，这些因素如何影响三重态粒子数及转换效率的机制尚未得到清晰的解释。

蒽(Anthracene)作为芳香族化合物中的代表性分子，具有高度共轭的π电子结构，是优良的有机半导体材料，其三重态-三重态湮灭现象[7-8]已被观测到，蒽及其衍生物已被作为受体分子应用到上转换技术中。Bard 和 Mkrrifield 等[9-10]分别研究了磁场对于蒽处于溶液状态和晶体状态下三重态-三重态湮灭的影响，观测到了溶液与晶体中不同的相互作用机制。Zhao 等[11]利用 Bodipy-蒽二元化合物分子在溶液状态下研究了蒽的取向及偶极矩对二元化合物分子自旋-轨道电荷转移系间窜越(SOCT-ISC)的影响，提出了平行/反平行的偶极矩取向的电荷转移供体和受体可能更有利于 SOCT-ISC 的观点。Chujo 等[12]利用八乙基卟啉铂(PtOEP)和蒽组合在含有树枝状大分子的溶液中，研究了 pH 值对上转换效率的影响。Zhang 等[13]采用将蒽基团连接在聚合物链上形成的聚合物分子作为受体，PtOEP 作为光敏剂，研究了聚合物链中不同浓度的蒽对上转换效率的影响。根据目前的研究发现不同状态下(溶液、聚合物膜以及晶体)，蒽的三重态表现出明显差异，但这些差异还没有得到清晰的解释。因此，将蒽作为模型系统研究不同状态下三重态吸收性质可以为上转换技术提供更多参考。

三重态-三重态湮灭与三重态的粒子数量紧密相关，瞬态吸收光谱作为研究分子激发态性质的有力工具，利用分子瞬态吸收度变化研究其激发态弛豫通道和迁移粒子数变化。本文采用瞬态吸收光谱研究了蒽在不同状态下的三重态弛豫过程，分析其三重态弛豫不同时间尺度的内在原因，建立模型分析讨论了在甲苯溶液和 PMMA 薄膜中三重态吸收信号强度差异的根源。

1 实验部分

1.1 样品制备

制备了蒽分布在三种不同状态的样品，溶液样品由蒽溶解于甲苯溶液中，浓度为 0.27 mg/ml，标记样品“An(Toluene)”。薄膜样品由旋涂法制备，将 30 mg 蒽溶解于 10 ml 5wt% 二氯甲烷溶解的 PMMA 中，在 1 mm 厚石英基底上以 1 000 r/min 旋涂 60 s，重复旋涂 3 次，厚度约为 5 μm，标记样品“An(PMMA)”。晶体样品在过饱和的含蒽甲苯溶液中生长，标记样品“An(Crystal)”。

1.2 仪器与实验方法

利用紫外可见近红外分光光度计(Cary5000，Agilent)进行稳态吸收测量。飞秒时间分辨瞬态吸收光谱系统由飞秒激光器系统(Coherent)和 Helios 探测系统(Ultrafast systems LLC)两部分组成。飞秒激光器产生的脉冲激光(800 nm，35 fs，1 kHz)经分束后分别进入参量放大器产生激发光和照射到非线性晶体产生探测白光。两束光焦点在样品表面重合，通过交替记录有无泵浦光时探测光的强度变化，从而反映样品对探测光的吸收情况。实验采用 375 nm 作为激发光，330～650 nm 白光作为探测光。微秒时间尺度的测量由飞秒激光器泵浦参量放大器产生的激光作为激发光，超连续介质激光器产生的白光作为探测光，泵浦-探针延迟由时序电路控制。测试时采用 375 nm 处基态吸收度同为 0.7 的溶液和含蒽固体 PMMA 样品，溶液采用 1 mm 厚比色皿盛装，所有 8 ns 时间范围内的瞬态吸收测试均采用 50 μW 的功率。纳秒闪光光解系统由纳秒激光器(Litron Laser，脉宽 5～6 ns，355 nm)、单色仪、500 W 连续氙灯、光电倍增管 PMT、示波器组成。探测光经第一个单色仪分光后与激发光交叉汇聚到样品上，经第二个单色仪分光后进入光电倍增管转化为电信号后再进入示波器。

2 实验结果

图 1 显示了蒽在甲苯溶液、PMMA 中和晶体状态时的基态吸收光谱。蒽在甲苯溶液和 PMMA 中的主要吸收峰均位于 342，359 和 379 nm 附近，而在晶体中，吸收峰出现了明显红移。

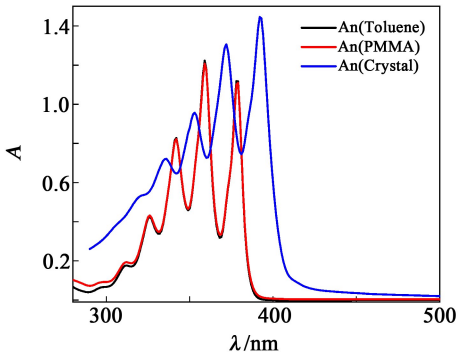
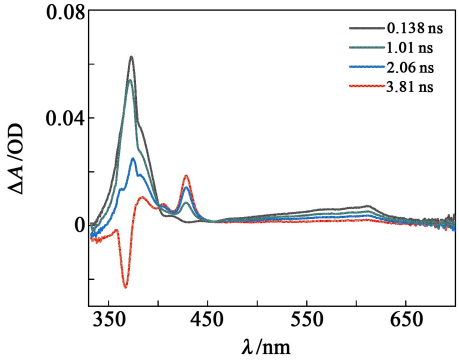
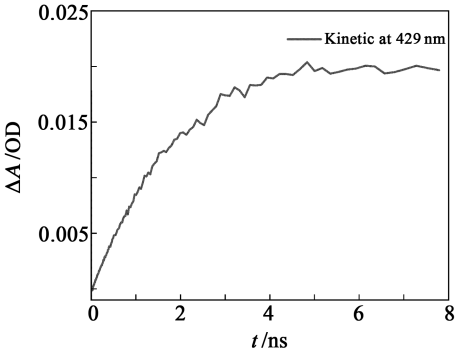


图 1　蒽在不同状态下的稳态吸收光谱

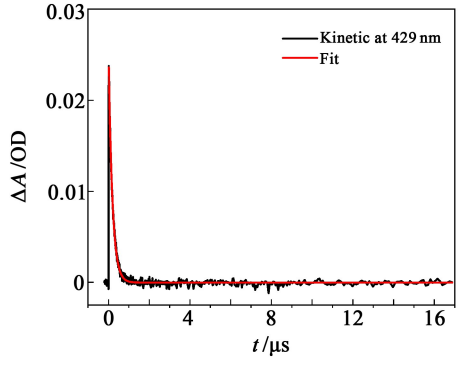
图 2 为蒽在甲苯溶液中的瞬态过程，发现其在 429 和 612 nm 附近具有明显的吸收峰。如图 2(a)所示，随着时间增长，429 nm处吸收不断增强，但 612 nm 处吸收则不断减弱，结合之前的报道[14]，可以将 429 nm 处吸收归属为三重态-三重态吸收，而 612 nm 附近的宽吸收峰则为单重激发态吸收。图 2(b)为 8 ns 内蒽在甲苯溶液中的 429 nm 处三重态吸收信号的变化曲线，约在 6 ns 时吸收信号强度达到最大。图 2(c)为 429 nm 在微秒时间尺度的瞬态过程，采用单指数拟合，得到了约 187.1 ns 的三重态寿命。



(a) 0～4 ns 范围内的瞬态吸收光谱



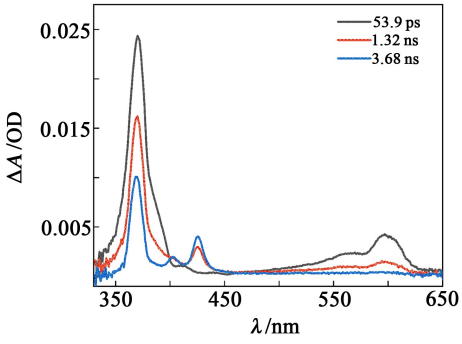
(b) 0～8 ns 范围内 429 nm 处的动力学曲线



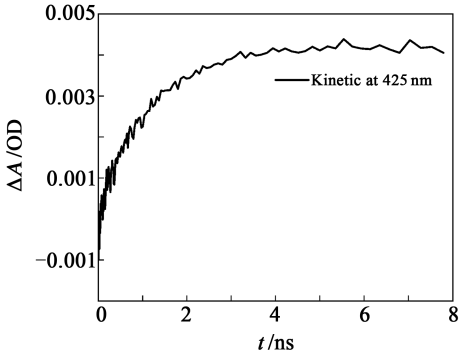
(c) 0～17 μs 范围内 429 nm 处的动力学曲线

图 2　蒽在甲苯溶液中的瞬态吸收光谱

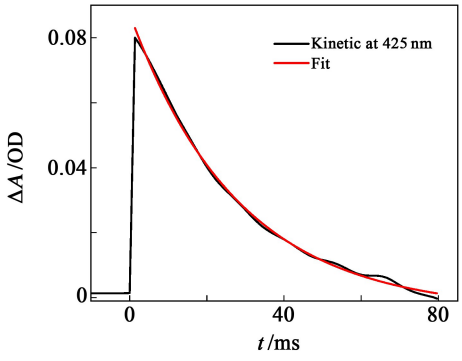
蒽在 PMMA 中的飞秒瞬态吸收光谱如图 3(a)所示，其三重态-三重态吸收峰位于 425 nm 附近，单重激发态吸收峰位于 597 nm 处，相较于蒽在甲苯溶液中，均发生了较小的蓝移。图 3(b)显示蒽在约 4 ns 时三重态吸收信号强度达到最大，约为同一激发功率下甲苯溶液中蒽最大吸收强度的1/5。对



(a) 0～4 ns 范围内的瞬态吸收光谱



(b) 0～8 ns 范围内 425 nm 处的动力学曲线

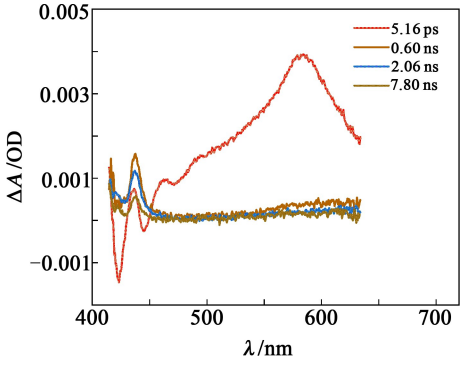


(c) 0～80 ms 范围内 425 nm 处的动力学曲线

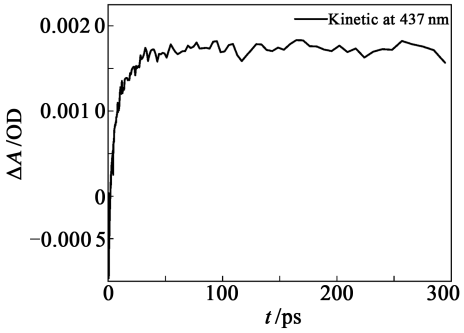
图 3　蒽在 PMMA 中的瞬态吸收光谱

425 nm 波长进行微秒瞬态吸收发现其三重态弛豫时间大于 17 μs，超过测试窗口的时间范围。进一步采用 355 nm 激发的闪光光解系统测试其寿命，经过单指数拟合得到了 28 ms 的三重态寿命，如图 3(c)所示，比其在甲苯溶液中的三重态寿命大 5 个数量级。

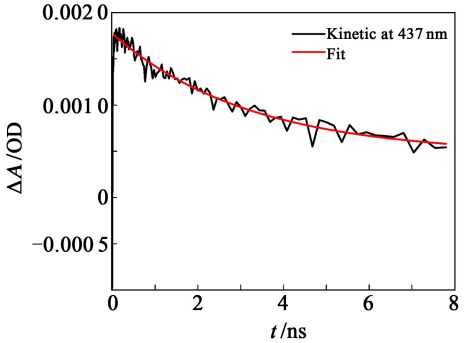
蒽晶体的瞬态吸收光谱如图 4(a)所示，由于其强烈的吸收，导致在低于 400 nm 的范围内未观测到瞬态吸收曲线。其三重态吸收峰相对于在溶液及 PMMA 中发生明显红移，峰值位于 437 nm 处。图 4(b)显示了 437 nm 处的三重态吸收信号在 300 ps 内的变化，约在 60 ps 时信号达到最大强度。在 375 nm 处，蒽晶体基态吸光度为 1，在甲苯溶液和 PMMA 中蒽分子基态吸光度为 0.7。经过计算可得，在同一激发功率和基态吸光度下，晶体中三重态最大吸收强度分别约为其在溶液与 PMMA 中的 1/17 和 5/17。图 4(c)显示了 437 nm 处在 8 ns 内的动力学曲线，采用单指数拟合得到约为 3.2 ns 的三重态寿命。



(a) 0～8 ns 范围内的瞬态吸收光谱



(b) 0～300 ps 范围内 437 nm 处的动力学曲线



(c) 0～8 ns 范围内 437 nm 处的动力学曲线

图 4 蒽在晶体中的瞬态吸收光谱

3 分析与讨论

稳态吸收光谱反映了分子 S_0-S_1 跃迁的性质，图 1 中蒽在甲苯溶液中与 PMMA 中的吸收光谱形状相同，峰位相近，表明其在 PMMA 中仍以单分子形式存在。溶液中，溶质分子的三重态通常会被氧分子所猝灭[15]，导致分子的三重态寿命减小。另一方面，在刚性 PMMA 框架中声子的弛豫通道被有效降低。这两方面的原因导致图 2(c)所得到的蒽分子在溶液中的三重态寿命与图 3(c)中蒽分子在 PMMA 中的三重态寿命相差较大。在晶体中，三重态寿命较短的原因可能是晶体结构缺陷和杂质所引起的[16]。

下面，我们建立模型来分析溶液和 PMMA 中蒽分子最大三重态吸收信号强度差异来源。由于分子的大小远小于辐射波长，可以将蒽分子视为一个点偶极子，满足偶极-偶极近似。

分子偶极矩由自身固有偶极矩 μ_0、光场诱导偶极矩 μ_e 和偶极-偶极之间的感应偶极矩 μ_r 组成。其中，诱导偶极矩与所处的激光场强度 E 成正比：

$$\mu_{ei} = -\chi_{0i} E \cos\theta_i \tag{1}$$

式中，χ_{0i} 为第 i 个偶极子的极化率，θ_i 为第 i 个偶极子与电场方向的夹角。

由上式可知，当线偏激光场 E 的偏振方向与分子取向成 θ 角时，θ 越小诱导偶极矩越大，$\theta=0°$时达到极值。激光场未入射时，蒽在溶液和 PMMA 中无规分布。当线偏激光场 E 入射到溶液中，由于分子自由度较高且可自由转动，分子受入射激光场极化，偶极矩重新排布，诱导偶极矩较大。

由于蒽自身固有偶极矩和电场诱导偶极矩的存在，需考虑偶极-偶极之间的相互作用。对于偶极子 1，偶极子 2 对其产生的电场为：

$$E_2 = \frac{3(\mu_2 r_{12}) r_{12} - \mu_2 r_{12}^2}{r_{12}^5} \tag{2}$$

式中，μ_2 为第 2 个偶极子的偶极矩，r_{12} 为第 1 个和第 2 个偶极子之间的距离。

由上式可知，偶极子 2 对偶极子 1 产生的电场与偶极方向和距离有关，且与间距成反比。

进一步考虑上述两种因素对目标分子偶极矩产生的总影响。假设入射电场与 1、2 偶极子的连线成 α 角，外电场和偶极子之间的相互作用对目标偶极子产生的偶极矩可以表示为：

$$\mu_{1x}=\chi_{01}\left(E\cos\alpha+\frac{2\mu_{2x}}{r_{12}^3}\right) \tag{3}$$

$$\mu_{1y}=\chi_{01}\left(E\sin\alpha-\frac{2\mu_{2y}}{r_{12}^3}\right) \tag{4}$$

$$\mu_{2x}=\chi_{02}\left(E\cos\alpha+\frac{2\mu_{1x}}{r_{12}^3}\right) \tag{5}$$

$$\mu_{2y}=\chi_{02}\left(E\sin\alpha-\frac{2\mu_{1y}}{r_{12}^3}\right) \tag{6}$$

式中，μ_{ix}，μ_{iy} 分别为第 i 个偶极子受到的偶极矩在 x 轴和 y 轴的投影；r_{12} 为两个偶极子之间的距离。

可以得到[17]：

$$\mu_{1x}=r_{12}^3E\omega_{s1}\cos\alpha\times\left[\frac{(\Omega_2+2\omega_{s2})(\Omega_1\Omega_2-\Gamma_1\Gamma_2-4\omega_{s1}\omega_{s2})+\Gamma_2(\Omega_1\Gamma_2+\Omega_2\Gamma_1)}{(\Omega_1\Omega_2-\Gamma_1\Gamma_2-4\omega_{s1}\omega_{s2})^2+(\Omega_1\Gamma_2+\Omega_2\Gamma_1)^2}+\mathrm{i}\frac{\Gamma_2(\Omega_1\Omega_2-\Gamma_1\Gamma_2-4\omega_{s1}\omega_{s2})-(\Omega_2+2\omega_{s2})(\Omega_1\Gamma_2+\Omega_2\Gamma_1)}{(\Omega_1\Omega_2-\Gamma_1\Gamma_2-4\omega_{s1}\omega_{s2})^2+(\Omega_1\Gamma_2+\Omega_2\Gamma_1)^2}\right]\times\exp(\mathrm{i}\omega t)+c.c. \tag{7}$$

$$\mu_{1y}=r_{12}^3E\omega_{s1}\sin\alpha\times\left[\frac{(\Omega_2-\omega_{s2})(\Omega_1\Omega_2-\Gamma_1\Gamma_2-\omega_{s1}\omega_{s2})+\Gamma_2(\Omega_1\Gamma_2+\Omega_2\Gamma_1)}{(\Omega_1\Omega_2-\Gamma_1\Gamma_2-\omega_{s1}\omega_{s2})^2+(\Omega_1\Gamma_2+\Omega_2\Gamma_1)^2}+\mathrm{i}\frac{\Gamma_2(\Omega_1\Omega_2-\Gamma_1\Gamma_2-\omega_{s1}\omega_{s2})-(\Omega_2-\omega_{s2})(\Omega_1\Gamma_2+\Omega_2\Gamma_1)}{(\Omega_1\Omega_2-\Gamma_1\Gamma_2-\omega_{s1}\omega_{s2})^2+(\Omega_1\Gamma_2+\Omega_2\Gamma_1)^2}\right]\times\exp(\mathrm{i}\omega t)+c.c. \tag{8}$$

式中，$\omega_{si}=|\mu_{12i}|^2/(\hbar r_{12}^3)$ 是第 i 个偶极子由于与相邻偶极子的相互作用而产生的共振频移，$|\mu_{12i}|^2$ 为第 i 个偶极子在能态 1 和 2 之间跃迁的偶极矩的平方模量，$\Omega_i=\omega_i-\omega$ 为共振失谐；ω 为偶极矩的频率，$\hbar$ 为约化普朗克常数，Γ_i 为均匀线宽。

该结果为外电场 E 和偶极子 2 对偶极子 1 偶极矩总的影响，当偶极子 1 处于溶剂中时，应考虑所有分子对其偶极相互作用的影响。当分子处于甲苯溶液中时，蒽分子易被光场极化，偶极子会被旋转到与激光场偏振同方向；但在 PMMA 中，蒽分子被固定在刚性框架中，不易被光场极化，此时需要对诱导偶极矩和偶极-偶极相互作用进行统计平均。由于在 PMMA 中蒽分子无规分布，可以假设其在 4π 空间内均匀分布，对偶极子在 4π 空间的分布进行统计积分后，蒽分子间的偶极-偶极相互作用抵消，但外电场诱导偶极矩的宏观统计极化仍然存在。

当激发功率为 50 μW，激发光斑直径为 100 μm 时，代入以上实验条件，对溶剂与 PMMA 中外电场和分子间偶极-偶极相互作用导致的分子偶极矩进行 4π 空间统计求和后相比，比值如下：

$$\sum_{n_T}\mu_T\Big/\sum_{n_P}\mu_P\approx 2.40 \tag{9}$$

式中，$\mu_T=5.33D$ 和 $\mu_P=3.23D$ 分别为光场入射后蒽分子在甲苯溶液和 PMMA 中产生的偶极矩，n_T 与 n_P 分别为蒽分子在甲苯溶液和 PMMA 中的数量。

由于样品吸光度 A 与偶极矩 μ 的平方成正比：

$$A\propto\mu^2 \tag{10}$$

可以得到

$$A_T/A_P\approx 5 \tag{11}$$

式中，A_T，A_P 分别为甲苯溶液和 PMMA 中蒽分子的三重态最大吸收度。

该结果与实验结果相对应，表明该理论模型建立合理，因此可以将 PMMA 中蒽分子的三重态最大吸收信号强度比溶液中小归因为 PMMA 中光场入射后宏观统计极化产生的偶极矩小于溶液中光场入射后产生的偶极矩。

晶体中蒽分子间距更小且方向统一，导致偶极-偶极相互作用增强，单重态能级的 Davydov 分裂增强[18]，提高了其 S_1 能级的位置，使得 T_2 能级高于 S_1 能级[19]，另外 S_1-T_1 能量差较大，这两个能级之间的耦合较差，导致向更高三重态能级跃迁的粒子数变少，影响了三重态吸收，这进一步解释了图(b)中晶体的最大三重态吸收信号低于图 2(b)和图 3(b)中观测到的溶液和 PMMA 中的信号。

4　结论

利用稳态吸收光谱以及瞬态吸收光谱研究了蒽在溶液、聚合物和晶体状态下的三重态吸收性质。溶液中蒽分子三重态寿命短于 PMMA 中的原因为

氧气对蒽分子三重态的猝灭以及刚性框架中声子弛豫通道的降低，晶体中较短的三重态寿命为晶体缺陷和杂质引起。建立偶极-偶极相互作用下的电场诱导偶极模型，分析了蒽在三种状态下三重态最大吸收信号强度差异的产生原因，解释为聚合物体系中电场较难诱导分子偶极极化，只引起宏观统计极化，导致了较小的宏观偶极矩，甲苯溶液中分子易被极化，产生较大的偶极矩，导致 PMMA 中的三重态最大吸收信号强度 5 倍低于溶液状态下。在晶体状态下，能级发生翻转，影响了系间窜越，产生了较小的三重态吸收信号。本文对三种状态下蒽分子三重态差异的分析，为进一步研究不同状态下的上转换提供了新的参考。

参考文献：

[1] Schloemer T, Narayanan P, Zhou Q, et al. Nanoengineering triplet-triplet annihilation upconversion: From materials to real-world applications[J]. ACS Nano, 2023, 17(4): 3259-3288.

[2] Lin Y L, Koch M, Brigeman A N, et al. Enhanced sub-bandgap efficiency of a solid-state organic intermediate band solar cell using triplet-triplet annihilation[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(6): 1465-1475.

[3] Chen C H, Tierce N T, Leung M K, et al. Efficient triplet-triplet annihilation upconversion in an electroluminescence device with a fluorescent sensitizer and a triplet-diffusion singlet-blocking layer[J]. Adv. Materials, 2018, 30(50): 1804850.

[4] Kim J H, Kim J H. Encapsulated triplet-triplet annihilation-based upconversion in the aqueous phase for sub-band-gap semiconductor photocatalysis[J]. J. American Chemical Society, 2012, 134(42): 17478-17481.

[5] Liu Q, Yang T, Feng W, et al. Blue-emissive upconversion nanoparticles for low-power-excited bioimaging in vivo[J]. J. American Chemical Society, 2012, 134(11): 5390-5397.

[6] Gray V, Moth-Poulsen K, Albinsson B, et al. Towards efficient solid-state triplet-triplet annihilation based photon upconversion: Supramolecular, macromolecular and self-assembled systems[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2018, 362: 54-71.

[7] Mcmanhon D, Kestigian M. Triplet-triplet annihilation in anthracene at low-excitation intensities: Wavelength and temperature dependence[J]. J. Chem. Phys., 1967, 46(1): 137-142.

[8] Tfibel F, Lindqvist L. Excited singlet yield in T-T annihilation, a comparative study of naphthalene and anthracene in solution[J]. Chemical Phys., 1975, 10(2): 471-478.

[9] Faulkner L R, Bard A J. Magnetic field effects on anthracene triplet-triplet annihilation in fluid solutions[J]. J. American Chemical Society, 1969, 91(23): 6495-6497.

[10] Johnson R, Merrifield R. Effects of magnetic fields on the mutual annihilation of triplet excitons in anthracene crystals[J]. Phys. Rev. B, 1970, 1(2): 896.

[11] Wang Z, Zhao J. Bodipy-anthracene dyads as triplet photosensitizers: Effect of chromophore orientation on triplet-state formation efficiency and application in triplet-triplet annihilation upconversion[J]. Organic Lett., 2017, 19(17): 4492-4495.

[12] Tanaka K, Inafuku K, Chujo Y. Environment-responsive upconversion based on dendrimer-supported efficient triplet-triplet annihilation in aqueous media[J]. Chemical Communications, 2010, 46(24): 4378-4380.

[13] Yu X, Cao X, Chen X, et al. Triplet-triplet annihilation upconversion from rationally designed polymeric emitters with tunable inter-chromophore distances[J]. Chemical Communications, 2015, 51(3): 588-591.

[14] Porter G, Windsor M W. Studies of the triplet state in fluid solvents[J]. Discussions of the Faraday Society, 1954, 17: 178-186.

[15] Gijzeman O, Kaufman F, Porter G. Oxygen quenching of aromatic triplet states in solution. Part 1[J]. J. of the Chemical Society, Faraday Transactions 2: Molecular and Chemical Physics, 1973, 69: 708-720.

[16] Arnold S, Whitten W, Damask A. Triplet exciton trapping by dislocations in anthracene[J]. J. Chem. Phys., 1970, 53(7): 2878-2884.

[17] Slabko V V E, Tsipotan A S, Aleksandrovsky A S. Self-organised aggregation of a pair of particles with different resonant frequencies and electric dipole moments of transitions, controlled by an external quasi-resonant field[J]. Quantum Electron., 2013, 43(5): 458-462.

[18] Philpott M. Dipole davydov splittings in crystalline anthracene, tetracene, naphthalene, and phenanthrene[J]. J. Chem. Phys., 1969, 50(12): 5117-5128.

[19] Kellogg R. Second triplet state of anthracene[J]. J. Chem. Phys., 1966, 44(1): 411-412.

作者简介：

周　庆(1997—)，男，宁夏回族自治区银川市人，硕士研究生，主要研究方向为超分辨光刻；

孙　静(1986—)，女，河南省周口市人，硕士，助理研究员，主要研究方向为超分辨光刻材料、光学成像及相关纳米材料；

王中阳(1969—)，男，浙江省安吉县人，博士，研究员，博士生导师，主要研究方向为超分辨光刻、超分辨成像及超快光谱技术。