具有结构色的 α -磷酸锆/有机溶剂分散体系

张超^{a,b} 张宝庆^{a,b} 刘琛阳^{*,a,b}

(^a 中国科学院化学研究所 北京分子科学国家研究中心 中国科学院工程塑料重点实验室 北京 100190)

(^b 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 对 α -磷酸锆(α -ZrP)/H₂O 分散体系利用离心沉淀-再分散的方法, 进行溶剂置换制备 α -ZrP 的有机溶剂分散体系。意外发现, 使用这个方法可以容易地得到具有结构色的 α -ZrP/有机溶剂分散体系。以丙酮为溶剂, 当 α -ZrP 质量分数在 0.76%~1.86% 之间时, 分散体系可以反射 426~635 nm 范围内的可见光, 表现出相对应的结构色。增加体系中离子浓度, 呈现红色结构色的 α -ZrP/丙酮分散体系(α -ZrP 质量分数 0.87%)的紫外-可见光反射光谱曲线发生蓝移, 表明体系中周期结构的形成主要依赖于 α -ZrP 纳米片层之间的静电排斥力。结构色的形成还存在一定的尺寸依赖性, 大尺寸的 α -ZrP 纳米片相对于小尺寸样品(1.10 μ m vs. 0.48 μ m)更容易形成表现出结构色的长程有序结构。利用此方法, 还得到了以乙腈和丁腈为溶剂, 具有明显结构色的分散体系。目前, 研究中使用的许多片状无机粒子都具有与 α -ZrP 晶体相似的层间表面电荷结构, 因此本工作所报道的方法对制备这类粒子的长程有序分散体系具有普遍借鉴意义。

关键词 α -磷酸锆; 纳米片状粒子; 分散体系; 液晶相; 结构色

Dispersions of α -Zirconium Phosphate/organic Solvent with Structural Colors

Zhang, Chao^{a,b} Zhang, Baoqing^{a,b} Liu, Chenyang^{*,a,b}

(^a Beijing National Laboratory for Molecular Sciences, CAS Key Laboratory of Engineering Plastics, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(^b University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract α -zirconium phosphate (α -ZrP) crystals with high-crystallinity were synthesized via hydrothermal method and exfoliated with tetrabutylammonium hydroxide (TBAOH) in aqueous dispersion maintained at 0 °C in an ice bath. The exfoliated α -ZrP nano-sheets were then transferred into selected organic solvents, such as acetone, via centrifugal precipitation and re-dispersion process. This process was repeated 3 to 5 times to replace the water with the desired organic solvents. During the solvent-replacing process, most of the free TBAOH in α -ZrP/H₂O dispersion was also removed, which was confirmed by characterizing the organic contents via thermo-gravimetric analysis for the solids obtained from both the water dispersion and the resulted acetone dispersion. Serendipitously, the dispersions of α -ZrP/organic solvent with structural colors could be easily obtained using this solvent-replacement method. After the solvent-replacing process was repeated for 5 times, the resulted α -ZrP/acetone dispersions could reflect visible light in the range of 426 nm to 635 nm when the mass fraction of α -ZrP was between 0.76% and 1.86%, thus showing the corresponding structural colors. Increasing the concentration of TBA⁺ ions in α -ZrP/acetone dispersion (α -ZrP mass fraction 0.87%), its UV-Vis reflection spectrum showed a blue-shift, indicating that the formation of periodic structures mainly depended on the electrostatic repulsion between α -ZrP nano-sheets. The formation of structural color also showed a size-dependence on the exfoliated α -ZrP nano-sheets. The nano-sheets with large-size was more likely to form the long-range ordered structure showing structural color compared with the relatively small ones (1.10 μ m vs. 0.48 μ m). The dispersions with acetonitrile or butyronitrile as solvent, which exhibited obvious structural colors, could also be obtained using this solvent-replacement method. At present, many plate-like inorganic particles used in the research have intrinsic charges on their gallery faces that similar to the microstructure of α -ZrP crystals, so the method reported here can give general guidance for the preparation of the dispersions with long-range periodic structures for these particles.

Keywords α -zirconium phosphate; nano-sheets; dispersion; liquid crystal phase; structural color

1 引言

二维片状纳米粒子具有较大的径厚比, 根据

Onsager 排除体积效应理论, 其分散体系在一定浓度以上能够自发形成液晶相^[1,2]。当分散体系中片状粒子的

* E-mail: liucy@iccas.ac.cn; Tel.: 010-62558903

Received October 14, 2020; published November 11, 2020.

Supporting information for this article is available free of charge via the Internet at <http://sioc-journal.cn>.

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21674122).

项目受国家自然科学基金(No. 21674122)资助。

间距进一步增大,与可见光波长在同一数量级时,可得到长程有序、具有结构色的“光子液晶”(photonic liquid crystals, photonic LCs)材料^[3,4]。基于分散体系的光子液晶具有良好的流动性,在外界刺激条件下可实现快速响应,因此在彩色显示、传感器和生物检测等方面具有潜在应用价值^[3-6]。

目前,文献报道的具有结构色的片状粒子分散体系还不多。Sue 等^[7]基于人工合成的 α -磷酸锆(α -ZrP)片状晶体(结构如图式 1a 所示),使用分子量 1000 左右的聚醚胺(分子结构如图式 1b 所示)在丙酮中对 α -ZrP 进行插层和辅助剥离,所得产物可进一步分散在丙酮、丁腈等极性、非质子性有机溶剂中,在一定浓度范围内形成了具有结构色的近晶型光子晶体材料。他们认为 α -ZrP 纳米片层之间不仅存在静电排斥作用,而且通过酸碱反应接枝在纳米粒子表面的聚醚胺具有体积位阻作用,二者的共同作用促进了光子液晶的形成。最近, Aida 等^[8]通过多次高速离心纯化的方法制备了仅由体积分数 0.5% 的钛酸盐纳米片(TiNS)组成的“光子水”材料,具有强负电性的 TiNS 之间由于静电排斥作用有序排列形成了长间距有序结构,表现出明显的结构色。

为了制备 α -ZrP 的纳米分散体系,研究者多是利用季铵盐,如四丁基氢氧化铵(TBAOH, 分子结构式如图式 1c 所示)对 α -ZrP 进行插层,并在水溶液中发生剥离,所得 α -ZrP/H₂O 分散体系易形成液晶相^[9-11],但从未在此类体系中观察到结构色现象。在我们的实验中,原计划对已经剥离后的 α -ZrP/H₂O 利用多次离心沉淀后再分散,同时进行溶剂置换的方法制备 α -ZrP 的有机溶剂分散体系。我们意外发现,利用此方法可以很容易地得到具有结构色的 α -ZrP 的有机溶剂分散体系。不同于 Sue 等^[7]的结果,我们的体系中 α -ZrP 是利用片层之间的静电排斥作用形成了在有机溶剂中的长程有序结构。目前

图式 1 (a) α -磷酸锆(α -ZrP), (b)聚醚胺 M1000 和(c)四丁基氢氧化铵(TBAOH)的分子结构示意图

Scheme 1 Molecular structures of (a) α -zirconium phosphate (α -ZrP), (b) polyether amine M1000 and (c) tetrabutylammonium hydroxide (TBAOH)

研究中用到的许多片状无机晶体都与 α -ZrP 晶体类似,具有层间的表面电荷结构,因此本工作所报道的方法对制备这些粒子的具有结构色的长程有序分散体系具有普遍借鉴意义。

2 结果与讨论

2.1 α -ZrP 的水热法制备及剥离

α -ZrP 通过水热法来进行制备,通过控制反应时间可以得到不同尺寸的 α -ZrP 片状晶体^[9]。根据 SEM 照片,可以统计得到不同反应时间相对应的片状晶体的平均尺寸。水热反应 6 h 得到的 α -ZrP 晶体平均大小为 $(0.63 \pm 0.12) \mu\text{m}$ (图 S1a), 48 h 的则为 $(2.01 \pm 0.25) \mu\text{m}$ (图 1a)。二者的广角 X 射线衍射(WAXD)曲线(图 S1b)没有明显区别,表明二者的晶体完整程度相近,仅存在尺寸上的差别。如果未做特别说明,在后面的实验中使用的是水热反应 48 h 的 α -ZrP 样品($2.01 \mu\text{m}$)。

图 1 (a)水热反应 48 h 得到的 α -ZrP 片状晶体的 SEM 照片; (b)利用 TBAOH 插层剥离前后 α -ZrP 的广角 X 射线衍射(WAXD)曲线; (c)通过动态光散射法得到的剥离后 α -ZrP 纳米片的径向尺寸分布; (d)溶剂置换三次后和(e)溶剂置换五次后的 α -ZrP 分散体系

Figure 1 (a) SEM photograph of plate-like α -ZrP crystals after 48-hour hydrothermal reaction; (b) wide-angle X-ray diffraction (WAXD) curves of α -ZrP before and after exfoliation using TBAOH; (c) size distribution for exfoliated α -ZrP nano-sheets as measured by dynamic-light scattering method; α -ZrP dispersions after solvent-replacing for (d) three times and (e) five times

使用文献^[10]中建议的方法,利用 TBAOH 辅助 α -ZrP 在水中实现剥离。剥离后的 α -ZrP 纳米片在水中能稳定分散(>2 周),并且能够形成良好的液晶相,具有双折射效应(图 S2)。使用 WAXD 对 α -ZrP 在剥离前后的晶体结构进行了表征。剥离前的 α -ZrP 晶体直接以粉末状态进行测试,对于剥离后的样品,将其溶液滴在硅片上,自然挥干成膜后进行测试,所得结果如图 1b 所示。 α -ZrP 晶体原有的结晶衍射峰在剥离后完全消失,在 $2\theta = 5.27^\circ, 10.35^\circ, 15.42^\circ$ 处出现了三个新的衍射峰。这与

文献^[12]中利用 TBAOH 辅助剥离所得 α -ZrP 纳米片的 WAXD 曲线形状和衍射峰位置基本相同. Sue 等^[12]认为相应主衍射峰($2\theta=5.27^\circ$)所对应的片层间距(1.67 nm)是剥离后的 α -ZrP 纳米片在干燥过程中重新堆叠而引起的. 结合 α -ZrP 在水中的长期分散稳定性(>2 周), 可以认为这里得到的 α -ZrP 纳米片具有非常好的剥离程度. TBAOH 对水热反应 6 h 得到的 α -ZrP 晶体(0.63 μm)也有同样的剥离效果(图 S1c).

使用动态光散射法^[13]测量了剥离后 α -ZrP 纳米片的径向尺寸及其分布, 所得分布曲线如图 1c 所示. 水热反应 48 h 的样品对应纳米片的平均径向尺寸为(1.10 ± 0.37) μm , 水热反应 6 h 的样品为(0.48 ± 0.19) μm . 剥离后的 α -ZrP 纳米片径向尺寸相对于其晶体略有下降, 这可能源于剥离过程中超声的破坏作用.

2.2 α -ZrP 光子液晶的形成和机理

通过高速离心后溶剂置换的方法, 可以将剥离后的 α -ZrP 从水相转移至丙酮中^[14]. 实验中, 在 50 mL 的离心管中加入 30.0 g α -ZrP 水溶液(α -ZrP 质量分数约 2.5%), 在 10000 r/min 转速下(离心力约 9400 倍重力加速度)离心 30 min, 取出上清液(约 27.0 g)后, 再加入丙酮至溶液总质量为 30.0 g, 该过程即为一次溶剂置换. 溶液充分搅拌混合后, 再次离心沉淀. 丙酮置换三次后, 可以得到具有结构色的材料(图 1d, α -ZrP 质量分数仍为约 2.5%), 但是进一步将它稀释只能得到表现为蓝色和绿色结构色的分散体系; 丙酮五次置换后, 对于未经充分搅拌混合的样品(图 1e), 由于 α -ZrP 浓度梯度的存在, 离心管中上层溶液结构色偏红色, 下层结构色偏蓝色, 将之进一步稀释就可以得到从蓝色到红色的光子液晶材料.

TBAOH 能够插层 α -ZrP 使其发生剥离, 主要原因是 α -ZrP 片层间的磷酸根负离子与四丁基铵正离子(TBA^+)发生配对, 能够帮助 α -ZrP 晶体在超声波作用下发生剥离^[12, 13]. 剥离后的 α -ZrP 粒子表面仍带负电荷^[15], 这说明其表面的磷酸根负离子部分与 TBA^+ 离子发生配对, 剩余的 TBA^+ 离子作为反荷离子在 α -ZrP 纳米片周围形成双电层. 由于 α -ZrP 片层间存在比较强的静电排斥作用, 使得 α -ZrP 纳米片在水中可以发生有序排列^[10, 11, 13].

我们在制备 α -ZrP/丙酮体系时, 在溶剂置换过程中, 也通过移除上层清液去除了游离的 TBA^+ 离子. 将分散体系的溶剂挥发以后, 得到的固体产物进行热失重测试(图 S3), 结果表明经过五次离心和丙酮置换后, 固体中 TBAOH 的总质量分数由 44.0% 下降至 21.8%, 即体系中 TBAOH 与 α -ZrP 结构单元中磷酸根的物质质量比由约 1:2 减小至约 1:6. 因而溶液中自由的 TBA^+ 离子浓度大大降低, α -ZrP 片层之间静电排斥力随之增大; 而且分散介质由水转化成丙酮后, 由于溶剂介电性质和极性的变化, 片层间静电排斥力进一步增大^[7], 有序结构中的

片层间距也随着进一步扩大. 当片层间距与可见光波长在同一数量级时, 由于 Bragg 反射效应, 分散体系即表现出结构色.

以上机理与 Aida 等^[8]的报道类似, 他们成功制备 TiNS/ H_2O 光子液晶的关键也是在剥离 TiNS 晶体后, 多次高速离心去除游离的四甲基铵正离子, 使得溶液中离子浓度大幅下降, 从而保证了 TiNS 片层之间的静电排斥力.

2.3 α -ZrP 光子液晶结构色的调控

2.3.1 α -ZrP 浓度

将五次溶剂置换后得到的 α -ZrP/丙酮分散体系(α -ZrP 质量分数约 2.5%)进行定量稀释和充分搅拌混合, 可以得到具有不同结构色的光子液晶材料(图 2a), 与溶剂置换前的水分散体系形成了鲜明的对比(图 S2a). 对这些分散体系进行紫外-可见光反射光谱表征, 所得反射光谱如图 2b 所示. 在以丙酮为溶剂的体系中, α -ZrP 质量分数从 1.86% 降低到 0.76%, 反射峰波长由 426 nm 增加到了 635 nm. 根据 Platz 方程^[7] ($d=\lambda_{\text{max}}/2n$, n 为溶剂的折射指数, λ_{max} 为最大反射峰对应的波长)可以计算出波长和 α -ZrP 纳米片片层间距的对应关系(表 1). 结果显示, α -ZrP 的浓度越高, 在固定体积元内的纳米片越多, 片层受到的挤压越大, 导致片层间距缩小, 反射峰随之发生蓝移现象. 片层间距与 α -ZrP 体积分数的倒数呈线性关系(图 2b, 内插图). 另外, 反射峰的强度可以

图 2 不同浓度 α -ZrP/丙酮光子液晶的(a)照片和(b)紫外-可见光反射光谱曲线, 内插图显示了层间距(d)与 α -ZrP 体积分数的倒数($1/\phi$)之间的线性关系

Figure 2 (a) Photographs and (b) UV-Vis reflection spectra of α -ZrP/acetone photonic LCs with different α -ZrP concentrations. Inset image in (b) shows the linear relationship of inter-layer spacing (d) with inverse volume fraction of α -ZrP ($1/\phi$)

表 1 α -ZrP/丙酮光子液晶中通过 Platz 公式计算得到的 α -ZrP 纳米片层间距及对应体系中 α -ZrP 的质量分数

Table 1 d -Spacings calculated from the Platz equation and the corresponding mass fractions of α -ZrP nano-sheets for α -ZrP/acetone photonic LCs

Peak wavelength/nm	426	468	504	557	583	635
Mass fraction/%	1.86	1.51	1.26	1.09	0.94	0.76
d -spacing/nm	157	172	186	205	215	234

反映出 α -ZrP 分散体系中有结构程度高低, 反射峰越强表明体系有序程度越高^[16]. 因此, 高浓度的 α -ZrP 光子液晶体系具有更良好的周期性长程有序结构.

α -ZrP 的尺寸大小对分散体系的有序结构具有显著影响. 水热反应 6 h 得到的 α -ZrP 晶体经过在水中剥离分散(径向尺寸(0.48 ± 0.19) μm)以及丙酮五次置换后, 也能形成紫色、蓝色的光子液晶. 但随着逐渐稀释, 该体系的结构色逐渐消失(图 S4). 这表明除了片层的表面电荷性质以外, 纳米片层的尺寸对光子液晶材料的形成也有显著的影响. 片层的直径越小, 由于有序排列带来的能量补偿越少, 因而在浓度减小时越难继续保持其有序结构^[11,13].

2.3.2 TBA⁺ 离子浓度

在 α -ZrP/丙酮光子液晶中加入额外的四丁基氯化铵(TBA⁺Cl⁻), 原来为红色的光子液晶(α -ZrP 质量分数约 0.7%)随着 TBA⁺ 离子浓度增加逐渐发生蓝移(图 3a). 根据紫外-可见光反射光谱的结果(图 S5), 得到了离子浓度与反射峰波长的关系曲线(图 3b). 进一步可知, 片层间距与外加离子摩尔浓度的倒数呈线性关系(图 3b, 内插图).

外加反荷 TBA⁺ 离子的屏蔽作用, 使得 α -ZrP 纳米片表面双电层 Debye 长度降低, 因而粒子之间静电排斥力下降. 当排斥力不足以维持原本的层间距时, 片层就会靠近, 在宏观上就表现为结构色的蓝移现象^[4]. 这个现象证明了片层之间的静电排斥作用是 α -ZrP 在丙酮中形成长程有序结构的主要原因. 这也解释了三次离心-丙酮置换后得到的分散体系, 稀释后只能得到呈现蓝色和绿色结构色的材料, 是由于体系中自由的 TBA⁺ 离子去除得还不够充分.

2.3.3 溶剂

以乙腈、丁腈和 N,N -二甲基甲酰胺(DMF)为替换溶剂, 重复离心和溶剂置换的过程. 同样经过 5 次溶剂置换后, 在乙腈和丁腈中能容易地形成具有结构色的光子液晶材料(图 4), 但在 DMF 中无法形成光子液晶. 在表 S1 和表 S2 中列出了乙腈和丁腈两种体系中不同 α -ZrP 浓度下反射峰波长和层间距的对应关系. 现有结果初步表明溶剂的介电常数和极性是控制 α -ZrP 分散体系结构色形成的关键因素. 在表 2 中列出了研究中所使用的四种有机溶剂以及水的介电常数和 Hansen 溶解度参数(其中 δ_d 、 δ_p 和 δ_h 分别为总溶解度参数的色散力、极性力和

氢键黏合力分量). 首先, 所选用的有机溶剂的介电常数都远小于水的介电常数. 定性地讲, 溶剂介电常数的下降, 使得 α -ZrP 纳米片周围的自由离子的浓度下降, 因而纳米片表面双电层 Debye 长度增加, 粒子之间静电排斥力增加, 这有利于结构色的形成^[7]. 其次, 分散体系中不能形成结构色的 DMF 与丙酮、乙腈、丁腈等三种溶剂相比, DMF 的介电常数(38.3)与乙腈(36.6)接近, 但比丙酮(20.7)和丁腈(24.8)都大. 另外, DMF 的 Hansen 溶解度参数中 δ_h 部分与其它三种有机溶剂差别也较大. 更深入地探讨溶剂的性质对 α -ZrP 分散体系中结构色形成的影响, 需要更多的实验和必要的理论计算, 我们希望能后续文章中进行详细报道.

图 3 (a) α -ZrP/丙酮光子液晶(α -ZrP 质量分数约 0.87%)随着外加 TBA⁺ 离子浓度增加, 结构色变化的照片; (b) 反射峰波长与外加 TBA⁺ 离子浓度的关系曲线, 内插图显示了 α -ZrP 层间距与外加 TBA⁺ 离子浓度倒数之间的线性关系

Figure 3 (a) Photographs showing the changes of structural color for α -ZrP/acetone photonic LC (α -ZrP mass fraction 0.87%) with the increasing of externally added TBA⁺ concentrations; (b) relationship between the peak wavelength of reflection spectrum and the concentration of externally added TBA⁺ ions. Inset image shows the linear relationship of inter-layer spacing with inverse molar concentration of externally added TBA⁺ ions

表 2 所用溶剂的 Hansen 溶解度参数和介电常数

Table 2 Hansen solubility parameters and dielectric constants of the used solvents

Solvent	Hansen solubility parameter ^{a/} (MPa ^{1/2} at 25 °C)			Dielectric constant ^b
	δ_d	δ_p	δ_h	
Acetone	15.5	10.4	7	20.7
Butyronitrile	15.3	12.4	5.1	24.8
Acetonitrile	15.3	18.0	6.1	36.6
DMF	17.4	13.7	11.3	38.3
H ₂ O	15.5	16.0	42.3	80.1

^a Hansen solubility parameters are based on data from Barton^[17]. ^b Dielectric constants of solvents are based on data from Lide^[18].

图4 (a)乙腈和(b)丁腈为溶剂的 α -ZrP光子液晶照片以及相应的在(c)乙腈和(d)丁腈中形成的光子液晶的紫外-可见光反射光谱曲线
Figure 4 Photographs of α -ZrP photonic LCs formed in (a) acetonitrile and (b) butyronitrile, and the corresponding UV-Vis reflection spectra of α -ZrP photonic LCs formed in (c) acetonitrile and (d) butyronitrile

3 结论

本工作利用离心-溶剂置换的方法,成功制备了通过层间静电排斥力而形成的具有结构色的 α -ZrP/有机溶剂分散体系。通过调节体系中 α -ZrP纳米片浓度和离子浓度可以控制分散体系的结构色。初步研究了纳米片尺寸以及溶剂性质对分散体系结构色形成的影响。本工作所得结论不仅有助于进一步扩展 α -ZrP的功能化应用,而且对制备其它二维纳米粒子的长程有序分散体系具有借鉴意义。

References

- [1] Bates, M. A.; Frenkel, D. *J. Chem. Phys.* **1999**, *110*, 6553.
- [2] Miyamoto, N.; Nakato, T. *Isr. J. Chem.* **2012**, *52*, 881.
- [3] Li, P.; Wong, M. H.; Zhang, X.; Yao, H. Q.; Ishige, R.; Takahara, A.; Miyamoto, M.; Nishimura, R.; Sue, H. J. *ACS Photonics* **2014**, *1*, 79.
- [4] Shen, T. Z.; Hong, S. H.; Lee, B.; Song, J. K. *NPG Asia Mater.* **2016**, *8*, e296.
- [5] Wang, Y.-F.; Yang, Q.; Su, B. *Acta Chim. Sinica* **2017**, *75*, 1071 (in Chinese). (王亚锋, 杨倩, 苏彬, 化学学报, **2017**, *75*, 1071.)
- [6] Ye, C.-Q.; Chen, S.-R.; Li, F.-Y.; Ge, J.; Yong, P.-Y.; Qin, M.; Song, Y.-L. *Acta Chim. Sinica* **2018**, *76*, 237 (in Chinese). (叶常青, 陈硕然, 李凤煜, 葛婕, 勇沛怡, 秦萌, 宋延林, 化学学报, **2018**, *76*, 237.)
- [7] Wong, M. H.; Ishige, R.; Hoshino, T.; Hawkins, S.; Li, P.; Takahara, A.; Sue, H. J. *Chem. Mater.* **2014**, *26*, 1528.
- [8] Sano, K.; Kim, Y. S.; Ishida, Y.; Ebina, Y.; Sasaki, T.; Hikima, T.; Aida, T. *Nature Commun.* **2016**, *7*, 12559.
- [9] Sun, L. Y.; Boo, W. J.; Sue, H. J.; Clearfield, A. *New J. Chem.* **2007**, *31*, 39.
- [10] Chen, F.; Chen, M. F.; Chang, Y. W.; Lin, P. C.; Chen, Y.; Cheng, Z. D. *Soft Matter* **2017**, *13*, 3789.
- [11] Chen, M. F.; He, M.; Lin, P. C.; Chen, Y.; Cheng, Z. D. *Soft Matter* **2017**, *13*, 4457.
- [12] Sun, L. Y.; Boo, W. J.; Sue, H. J. *J. Chem. Mater.* **2007**, *19*, 1749.
- [13] Mejia, A. F.; Chang, Y. W.; Ng, R.; Shuai, M.; Mannan, M. S.; Cheng, Z. D. *Phys. Rev. E* **2012**, *85*, 061708.
- [14] Jalili, R.; Aboutalebi, S. H.; Esrafilzadeh, D.; Konstantinov, K.; Moulton, S. E.; Razal, J. M.; Wallace, G. G. *ACS Nano* **2013**, *7*, 3981.
- [15] Masud, A. R.; Hong, S. H.; Shen, T. Z.; Ahn, C. H.; Song, J. K. *Opt. Express* **2018**, *26*, 173.
- [16] Masud, A. R.; Hong, S. H.; Shen, T. Z.; Shahzad, A.; Song, J. K. *RSC Adv.* **2018**, *8*, 16549.
- [17] Barton, A. F. M. *CRC Handbook of Solubility Parameters and Other Cohesion Parameters*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL, **1991**.
- [18] Lide, D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 79th ed., CRC Press, Boca Raton, FL, **1999**.

(Cheng, B.)