

文章编号: 0253-2239(2006)10-1526-6

掺杂 CdS 纳米粒子聚合物的光折变效应研究*

丁莉芸¹ 姜德生¹ 黄俊^{1,2}

(¹ 武汉理工大学光纤传感器技术与信息处理教育部重点实验室, 武汉 430070)
(² 桂林工学院有色金属材料及其加工新技术教育部重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 研究了掺杂 CdS 纳米粒子的有机聚合物体系的光折变效应, 体系中以 CdS 纳米粒子为光敏剂, 聚乙烯吡啶 (PVK) 为载流子输运剂, 4-(4-硝基苯偶氮) 苯胺染料 (DO3) 为非线性生色团, 9-乙基吡啶 (ECZ) 为增塑剂。反胶束法合成的 CdS 胶束颗粒采用紫外-可见吸收光谱和透射电子显微镜 (TEM) 表征, 结果表明, 具有纳米尺寸和量子限制效应。研究了 PVK-CdS 薄膜的光电导特性, 实验结果表明, CdS 纳米粒子与 PVK 之间的电荷转移可以有效的提高 PVK 的光电导率。双光束耦合实验证明了该体系的光折变特性, 在无外加电场下, 获得二波耦合增益系数 78.4 cm^{-1} , 分析表明聚合物薄膜具有强的光致取向增强效应; 样品在两相干光束作用下, 可建立折射率光栅, 其衍射效率达到 4.4%。

关键词: 光学材料; 光折变效应; 有机-无机纳米复合; 光电导性; CdS 纳米粒子

中图分类号: O437 文献标识码: A

Photorefractive Effect of Polymer Sensitized by CdS Nanoparticles

Ding Liyun¹ Jiang Desheng¹ Huang Jun^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)
(² Key Laboratory of Nonferrous Materials and New Processing Technology, Guilin University of Technology, Ministry of Education, Guilin 541004)

Abstract: The organic-inorganic hybridized polymer system is studied for its photorefractive, which is sensitized by CdS nanoparticles, and combines PVK polymer to transmit carriers, DO3 nonlinear chromophores and ECZ as plasticizer. It is confirmed that the CdS colloidal particle has a nanoscale size and quantum confinement effect by adopting transmission electron microscopy and UV-Visible absorption spectroscopy. The photoconductive properties of the PVK-CdS thin films is studied. Significant enhancement in photoconductivity induced by charge transform between CdS nanoparticles and PVK has also been demonstrated. An asymmetric two-beam coupling gain of 78.4 cm^{-1} is obtained without the external electric field, confirming the photorefractive effect of the polymer. The experimental results showed that the polymer film possesses strong photo-induced orientation-enhanced photorefractive effect. When irradiated by two coherent beams, the sample can set up refractive index grating with the diffraction efficiency of 4.4%.

Key words: optical materials; photo refractive effect; organic-inorganic nanocomposite; photoconductivity; CdS nanoparticles

1 引 言

光折变材料在高密度数据存储、实时全息术、干涉测量、光放大、相位共轭、光学图像处理等多方

面^[1,2]具有巨大的应用前景。光折变聚合物从 1991 年^[3]首次报道至今得到了广泛的研究和快速的发展,这是由于与无机晶体相比具有显著的优点,高品质因数,掺杂和设计改性容易,加工性能优良,可方

* 国家自然科学基金重点项目(60537050)和有色金属材料及其加工新技术教育部重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 丁莉芸(1979~),女,甘肃兰州人,武汉理工大学材料科学与工程学院博士研究生,主要从事有机-无机纳米复合光折变材料合成与性能研究。E-mail: dlyw@sohu.com

导师简介: 姜德生(1949~),男,湖北武汉人,武汉理工大学教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及智能材料与结构的研究。E-mail: fosrcwut@public.wh.hb.cn

收稿日期: 2006-01-19; 收到修改稿日期: 2006-05-10

便制备成薄膜、块体、波导等所需形态^[4]。然而,在聚合物中获得显著的光折变效应需要较高的外加电场,一般在每微米几十伏到一百多伏,而样品的厚度大约在几十到一百多微米之间,所以外加电压接近万伏。另外,光折变响应速度慢,这些限制了光折变聚合物的实际应用。

半导体纳米粒子对于光折变聚合是一种新型的极具潜力的光敏剂。半导体纳米粒子的电子学和光学性能,如吸收起始边位置和振子强度等都取决于其尺寸大小和形状;其光电性能受其表面状态的强烈影响,可用有机分子对其表面进行修饰。因此,可以通过改变尺寸和表面修饰等调解其物理性能,将其与有机聚合物复合,对聚合物的光电性能进行改进。半导体纳米粒子具有优良的光敏性能,已有报道掺杂 CdS、CdSe 等半导体纳米粒子可以极大地提高导电聚合物(如 PVK、PPV)的光电导性能^[5~7],并有报道制备出一类新型的有机-无机纳米复合光折变聚合物在较低的电场下获得显著的光折变效应^[8~10]。因此,制备含半导体纳米粒子为光敏剂的有机-无机纳米复合光折变聚合物有望解决光折变聚合物响应速度慢、降低外加电场的问题,是一类具有应用前景的新型光折变材料。

本文以反胶束法制备的 CdS 纳米粒子为光敏剂,聚乙烯吡唑(PVK)为载流子输运剂,4-(4-硝基苯偶氮)苯胺染料(DO3)为非线性生色团,9-乙基吡唑(ECZ)为增塑剂制备有机-无机纳米复合光折变聚合物。对掺杂 CdS 纳米粒子的 PVK/CdS 薄膜进行光电导性能研究,运用双光束耦合(Two-beam couple)实验研究了该体系的光折变特性。

2 实 验

2.1 试剂

AOT(磺基琥珀酸双-2-乙基己基酯钠盐)、PVK(secondary standard)、DO3 和 ECZ 购于

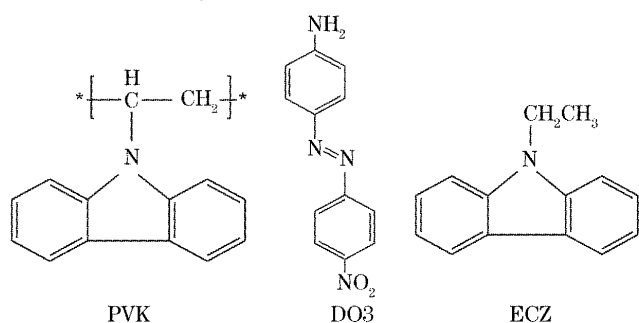


图 1 PVK、DO3 和 ECZ 的分子结构

Fig. 1 Molecular structures of PVK, DO3 and ECZ

ACROS 公司,其分子结构如图 1 所示。醋酸镉、硫化钠、正庚烷、四氢呋喃(THF)为国产试剂,对甲苯硫酚为百灵威公司进口分装。所有试剂均未经进一步纯化。

2.2 CdS 纳米粒子的合成

采用反胶束法合成纳米 CdS 粒子^[11],其尺寸通过改变水胶比 W_0 和反应时间等而调节。本文采用水胶比 $W_0=1$ 合成在波长 632.8 nm 具有敏感性的 CdS 纳米粒子,其中油相为正庚烷和 AOT 溶液,水相分别为醋酸镉和硫化钠溶液。并对 CdS 纳米粒子用对甲苯硫酚进行表面修饰,以提供其良好的化学稳定性,并确保在不同溶剂中具有良好的分散性。

2.3 PVK-CdS 光电导薄膜的制备

将 99 mg PVK 和 1 mg CdS 纳米粒子溶解于四氢呋喃(THF)中,溶液超声分散待充分溶解后,用旋涂法将溶液在氧化铟锡(ITO)玻璃上制成均匀的薄膜,80 °C 蒸发 12 h 完全去除溶剂,得到 1~2 μm 的 PVK-CdS 薄膜。然后用真空蒸镀法在有机薄膜上镀一层 Al 电极。

2.4 光折变材料器件的制备

将一定量的 PVK, DO3, ECZ 和 CdS 纳米粒子溶解于四氢呋喃(THF)中,蒸发去除溶剂,并真空干燥收集样品。加热到 120 °C 使样品成熔融态,用两片镀有氧化铟锡膜层的玻璃机械压制 1 h,获得 PVK:DO3:ECZ:Q-CdS 质量比为 56:15:28:1 的透明复合物薄膜样品。

2.5 测试仪器

CdS 纳米粒子的表征用 Shimadzu UV2450 分光光度计测定,并用日立公司 H-8100TEM 透射电镜观察其形貌、大小。PVK-CdS 纳米复合体系光电导性能用日立公司的 F-4500 型荧光分光光度计和 CHI650A 电化学工作站(上海辰华仪器公司)进行分析与测定。光折变 PVK:DO3:ECZ:Q-CdS 薄膜用台阶仪(Taylor Hobson 公司,FTSS2-S4C-3D)测试膜厚;其玻璃转化温度(T_g)用差热法(Perkin Elmer 公司,Pyris 1 DSC)测定。

3 实验结果与讨论

3.1 CdS 纳米粒子的表征

图 2 是水胶比为 $W_0=1$ 得到 CdS 纳米粒子的紫外-可见吸收光谱。可以看出,CdS 纳米粒子的吸收光谱中的 λ_{edge} 达到 488 nm,相对 CdS 体相材料($\lambda_{\text{edge}}=515$ nm)发生蓝移,表现出量子尺寸效应。根据价带顶和导带底的能隙与颗粒大小的关系,由

布儒斯(Brus)公式^[12]

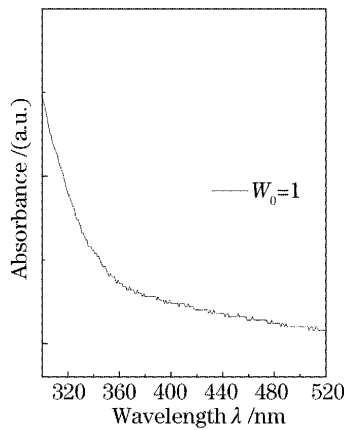


图 2 CdS 纳米粒子的紫外-可见吸收光谱
Fig. 2 UV-Visible spectra of CdS nanoparticles

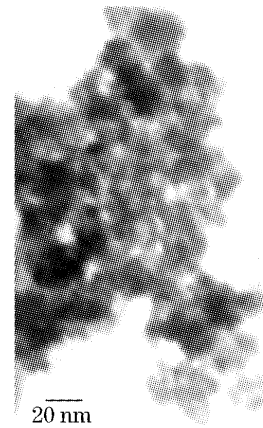


图 3 CdS 纳米粒子的透射电子显微镜照片
Fig. 3 Transmission electron microscopic image of nanoparticles

$$E = E_g(\text{bulk}) + h^2 \pi^2 \frac{1/m_e + 1/m_h}{2R^2} - \frac{1.786e^2}{\epsilon R} + Q, \quad (1)$$

可估算半导体 CdS 纳米粒子大小为 6.2 nm。式中 $E=hc/\lambda$, E 为激发态能量, $E_g(\text{bulk})$ 为体相材料能隙, Q 是修正项, h 为普朗克常数, m_e 、 m_h 分别为电子和空穴的有效质量, ϵ 是物质的介电常数, R 为半导体纳米颗粒的半径(球形颗粒)。

图 3 是 CdS 纳米粒子的透射电镜(TEM)照片。CdS 纳米粒子呈球形颗粒且团聚成粒子簇, 平均粒径约 20 nm(约由 3~4 个 CdS 粒子组成)。

3.2 PVK-CdS 薄膜的光电导

在光折变材料中, 光电导过程是材料必须具备的必要条件之一, 材料的光电导特性将直接影响其光折变的动力学过程。PVK-CdS 薄膜在 He-Ne 激光器 632.8 nm 波长下的电流-电压($I-V$)曲线如图 4(a)所示。可以看出, 随着电场增加, PVK 薄膜和 PVK-CdS 薄膜中光电流均增加。这是由于有机聚合物材料中光生载流子的迁移率与外电场强烈相关, 随着电场的增强, PVK 中光生载流子的跳跃率也增加。

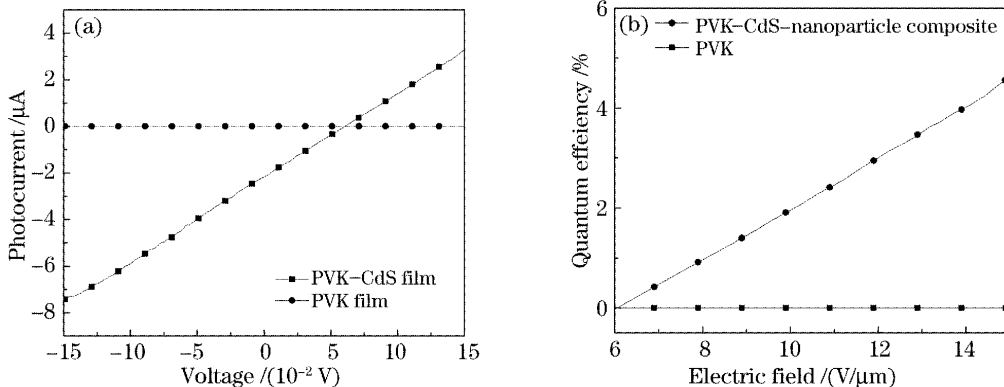


图 4 PVK-CdS 薄膜在 632.8 nm 的电流-电压($I-V$)曲线(a), 光生载流子量子效率(b)
Fig. 4 Current-voltage curve (a), photocarrier quantum efficiency (b) of PVK-CdS film under illumination at excitation wavelengths of 632.8 nm

PVK-CdS 薄膜的光生载流子量子效率 Φ 为

$$\Phi(E) = \frac{N_{\text{out}}}{N_{\text{ph}}} = \frac{I_{\text{out}}}{P_{\text{on}}} \frac{hc}{\alpha d e \lambda}, \quad (2)$$

式中 N_{out} 是单位体积光生载流子数, N_{ph} 是试样单位体积吸收的光子数, I_{out} 是测量的光电流, P_{on} 是入射光强, h 普朗克常量, c 是光速, e 是电子的电荷量,

λ 是入射光波长, α 是试样的吸收系数, d 是样品厚度。计算结果如图 4(b)所示, 可以看出, 掺杂 CdS 纳米粒子在 PVK 中显著的提高了 PVK 的光电导性能。

对 PVK 和 PVK-CdS 纳米复合物进行了荧光光谱测试, 如图 5 所示。可以看出, 掺杂 CdS 纳米

粒子使纯 PVK 的荧光强度有所减小,这是由于两者之间发生电荷转移引起的荧光猝灭。当吸收光子后,受激电子进入 PVK 中咪唑基团的最低未占有分子轨道(LUMO),空穴留在 PVK 的最高占有分子轨道(HOMO)。在纯 PVK 溶液中,受激电子通过辐射过程从导带返回价带;而当掺杂 CdS 纳米粒子时,由于二者的 LUMO 和 HOMO 能级的错位分布^[13],受激电子可以从 PVK 的 HOMO 中一部分会回到 LUMO,另外一部分则向 CdS 的 LUMO 迁移;而 CdS 纳米粒子中的空穴载流子有一部分向 PVK 的 HOMO 迁移,如图 5(b)中 A 所示。同时,当 CdS 吸收光子产生电子和空穴,立刻被吸附于

CdS 团簇表面。表面被陷阱的电子和空穴然后与周围的聚合物相互反应、交换电荷,如图 5(b)中 B 所示。在 PVK 中注入空穴最可能的位置是咪唑部分,空穴的传输可以由咪唑上游离阳离子的跳跃完成。而且,胺(即咪唑)是 CdS 团簇表面有效的配位剂,促进表面电荷转移反应。因此,掺杂 CdS 纳米粒子可以提高 PVK 基体中光激发电子-空穴对的电荷分离,从而提高了 PVK 的 HOMO 中空穴载流子的浓度和寿命,如图 5(c)中 C 所示,有效提高了复合体系的光电导性能。电场与电荷产生的关系可以用昂萨格(Onsager)电荷重结合模型分析^[14,15]。

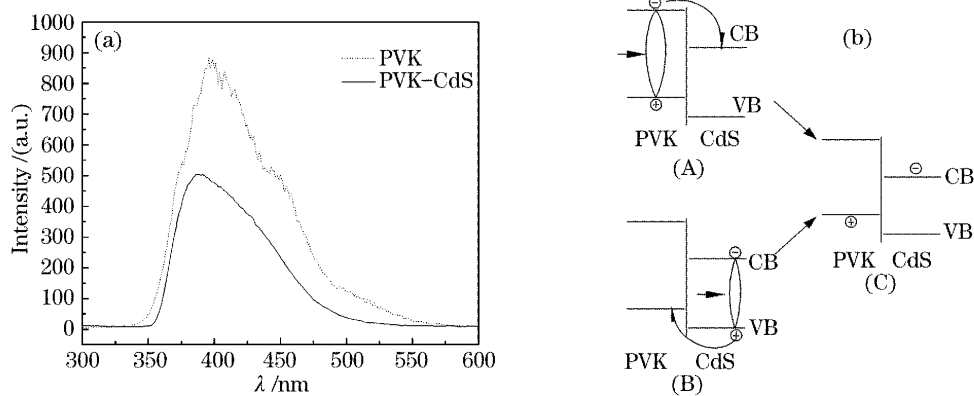


图 5 PVK 和 PVK-CdS 纳米复合物的荧光光谱(a),激发、电荷迁移示意图(b)

Fig. 5 Fluorescent spectrum (a), a schematic illustrations of the energy band profiles (b) of the PVK-CdS nanocomposite for excitation and charge transfer

光电导性是光诱导电荷产生和电荷传输共同作用的结果。由于 CdS 纳米粒子在 PVK 中含量很少仅为 1%,它们对 PVK 基体的传输性能影响较小,其主要作用是提高了电荷产生效率。

3.3 光折变特性

目前,双光束耦合技术被认为是确定材料是否有光折变效应的直接判据,即两束相干光在写入过程中的能量耦合现象,光能量从一束向另一束转移,结果一束光被增强而另一束光相应减弱,反映出光折变材料的非局域响应特性。在二波耦合实验中,两束相干光束由同一 He-Ne 激光器输出 30 mW 激光束分束得到,其强度分别为 3.0 mW 和 1.8 mW。两束相干光之间的夹角 $2\theta=14^\circ$,样品表面法线与两相干光束夹角的平分线的夹角为 50° 。光折变 PVK:DO3:ECZ:Q-CdS 薄膜厚度测试为 $23.8 \mu\text{m}$ 。

样品在二波耦合测量过程中,观察到相干相互作用的两束光之间发生能量转移;将样品旋转 180° ,两束光之间能量的转移发生反向,这是由于偶氮生色团偶极取向发生了反转的结果。在两束相干

光束照射样品后,用挡板挡住其中一束,发现被挡光束的对应的光路上产生了另一光束的衍射光,表明由于两束光相干形成的正弦光强空间调制分布,造成了样品折射率的相应空间调制,而形成折射率光栅。这些实验现象证明了该体系形成的光栅是由于光折变效应引起的,当两束光之间的能量传递的效率达到一定值后就出现饱和,记录数据如图 6 所示。

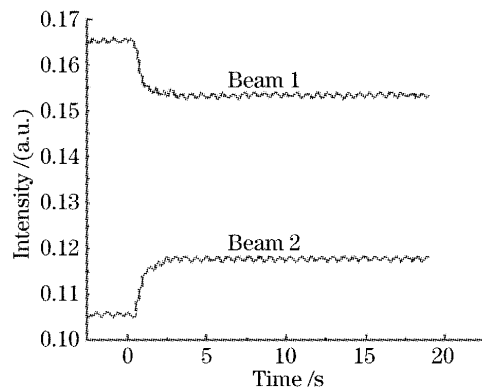


图 6 双光束耦合实验结果

Fig. 6 Two-beam coupling transients in the sample

二波耦合增益系数 Γ 为^[16]

$$\Gamma = \frac{1}{L} [\ln(\gamma_0\beta) - \ln(\beta + 1 - \gamma_0)], \quad (3)$$

式中 L 为光束在样品中的光程, β 为两相干光束在经过样品前强度的比值, γ_0 为光束耦合率, 定义为 $\gamma_0 = P_1/P_0$, 其中一束光在有抽运光时强度为 P_1 , 在无抽运光时的光强为 P_0 。

二波耦合写入的体光栅的衍射效率 η 为^[17]

$$\eta = I_{1d}/I_{10} = I_{2d}/I_{20}, \quad (4)$$

式中 I_{10} 和 I_{20} 分别为辐照刚开始 ($t = 0$) 时写入光的透射光强, 当两束写入光光束的透射光强达到稳态时, 快速挡住其中一束写入光, 在该光束的透射方向测得的光强便是另一束光在体相位栅上的衍射光强分别为 I_{2d} 和 I_{1d} 。

二波耦合增益系数和衍射效率的计算结果列于表 1, 在无外加电场下, 得到非零增益系数 $\Gamma = 78.4$ 和衍射效率 $\eta = 4.4\%$; 当样品在外加电场下, 同样观察到了双光束之间的能量转换。将实验结果与有机物 2,4,7-三硝基芴酮 TNF 作光敏剂的体系^[18] 和已有报道 CdS 作光敏剂的体系^[11] 进行比较 (见表 1) 可以看出, 用半导体 CdS 纳米粒子代替有机物 TNF 作光敏剂, 显著地提高了材料的光折变性能; 而衍射效率不及文献^[11] 在实验中加较大外电场 E_0 所报道的光折变材料高。

与无机晶体不同, 在光折变聚合物中, 由调制的内电场可以诱导产生空间调制双折射, 此取向双折射 (Orientational birefringence) 能够导致强烈的折

射率光栅^[4]。本文实验结果可解释为光致取向增强效应, 即空间电荷场使染料分子调节取向作有规则的定向排列, 建立双折射光栅从而导致光折变。对于类似的现象, 仅有少数几篇文章中有过报道^[19,20]。如前所述, 在 PVK-CdS 纳米复合体系中, PVK 与 CdS 间的电荷迁移有效地克服了激发电子的再复合, 提高了载流子的浓度和寿命, 进而提高光折变材料内部光致电荷场的形成速度和电场强度。而在两个芳环之间以 N=N 双键连接为特征的偶氮染料分子在光的作用下, 能产生顺式 (cis) 和反式 (trans) 之间的异构化反应, 且在偏振光激励下能发生光致分子取向重组, 因而具有光折变、光致各向异性和光致二向色性等优良的非线性光学 (NLO) 特性^[21,22]。由于加入增塑剂 ECZ, 此光折变体系的 T_g 较低, 测得为 45°C 。较大的内电场增大了非线性生色团 DO3 分子的偶极距从而极化了该分子, 使其在室温下即可发生有序取向排列, 取向双折射诱导形成折射率光栅。因此, 在无外加电场下, 材料即可产生明显的光折变效应。此外, 由于掺杂 CdS 纳米粒子加速了电荷载流子的运动速率, 从而提高了体系的光折变响应速度, 根据实验数据, 样品响应时间低于 10 s。然而, 仅用空间电荷场诱导分子取向来解释样品产生光折变光栅是不充分的, 还需要进一步研究样品中心对称在实验中如何破坏, 这也是今后研究的方向。

表 1 光折变体系的光折变特性

Table 1 Properties of the photorefractivity system

Samples	Composition /mass fraction	Γ / cm^{-1}	$\eta / \%$
PVK:DO3:ECZ:CdS	0.56:0.15:0.28:0.01	78.4	4.4
PVK:DO3:ECZ:TNFa ^[17]	0.74:0.20:0.05:0.01	5.9	—
PVK:TCP:NPP:CdSb ^[18]	0.565:0.375:0.0574:0.000191	59.5 ($E_0 = 119 \text{ V}/\mu\text{m}$)	8 ($E_0 = 137 \text{ V}/\mu\text{m}$)

4 结 论

将 CdS 纳米粒子作为光敏剂掺杂到有机聚合物中制备出新型的有机-无机纳米复合光折变材料, 研究表明, CdS 纳米粒子与 PVK 之间发生的电荷迁移有效地克服了激发电子的再复合, 提高了载流子的浓度和寿命, 显著地提高了 PVK 的光电导率。双光束耦合实验证明了 PVK-DO3-ECZ-Q-CdS 体系的光折变特性, 在无外加电场下, 获得二波耦合增益达 78.4 cm^{-1} , 衍射效率 η 达 4.4% , 表明聚合物薄膜具有强的光致取向增强光折变效应。可以看到

掺杂无机半导体纳米粒子的光折变聚合物是一类具有极大应用前景的新型光折变材料, 但当前理论尚未能完全解释此体系光折变效应的产生。

参 考 文 献

- Li Minghua, Yang Chunhui, Xu Yuheng. *Photorefractive Crystal Materials* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 9~10 (in Chinese)
李铭华, 杨春晖, 徐玉恒. 光折变晶体材料科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 9~10
- Liu Simin, Guo Ru, Ling Zhengfang. *Photorefractive Nonlinear Optics* [M]. Beijing: Standard Press of China, 1992. 104~134 (in Chinese)

- 刘思敏, 郭 儒, 凌振芳. 光折变非线性光学[M]. 北京: 中国标准出版社, 1992. 104~134
- 3 Stephan Ducharme, J. C. Scott, R. J. Twieg *et al.*. Observation of the photorefractive effect in a polymer[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(14): 1846~1849
- 4 Bernard Kippelen, Nasser Peyghambarian. Photorefractive polymers and their applications [J]. *Advances in Polymer Science*, 2003, **161**: 87~156
- 5 Jeffrey G. Winiarz, Liangmin Zhang, Manjari Lal *et al.*. Photogeneration, charge transport, and photoconductivity of a novel PVK/CdS-nanocrystal polymer composite [J]. *Chem. Phys.*, 1999, **245**: 417~428
- 6 N. C. Greenham, X. G. Peng, A. P. Alivisatos. Charge separation and transport in conjugated-polymer/semiconductor-nanocrystal composites studied by photoluminescence quenching and photoconductivity[J]. *Phys. Rev. B*, 1996, **54**(24): 17628~17637
- 7 Ying Wang, Norman Herron. Semiconductor nanocrystals in carrier-transporting polymers; Charge generation and charge transport[J]. *J. Luminescence*, 1996, **70**: 48~59
- 8 Canek Fuentes-Hernandez, Duck Jong Suh, Bernard Kippelen *et al.*. High-performance photorefractive polymers sensitized by cadmium selenide nanoparticles[J]. *App. Phys. Lett.*, 2004, **85**(4): 534~536
- 9 Jeffrey G. Winiarz, Paras N. Prasad. Photorefractive inorganic-organic polymer-dispersed liquid-crystal nanocomposite photosensitized with cadmium sulfide quantum dots [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(15): 1330~1332
- 10 Farzana Aslam, David J. Binks, Mark D. Rahn *et al.*. Photorefractive performance of a CdSe/ZnS core/shell nanoparticle-sensitized polymer[J]. *J. Chem. Phys.*, 2005, **122**: 184713~1847316
- 11 Jerrery G. Winiarz, Liangmin Zhang, Manjari Lal *et al.*. Observation of the photorefractive effect in a organic-inorganic nanocomposite[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1999, **121**: 5287~5295
- 12 Louis Brus. Electronic wave-functions in semiconductor clusters-experiment and theory[J]. *J. Chem. Phys.*, 1986, **90**: 2555~2560
- 13 Suhua Wang, Shihe Yang, Chunlei Yang *et al.*. Poly (N-vinylcarbazole) (PVK) photoconductivity enhancement induced by doping with CdS nanocrystals through chemical hybridization [J]. *J. Phys. Chem.*, 2000, **104**(50): 11853~11858
- 14 Y. Wang, N. Herron. Photoconductivity of CdS nanocluster-doped polymers[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1992, **27**: 71~75
- 15 L. Onsager. Initial recombination of ions[J]. *Phys. Rev.*, 1938, **54**: 554~557
- 16 W. E. Moerner, Scott M. Silence. Polymeric photorefractive materials[J]. *Chem. Rev.*, 1994, **94**(1): 127~155
- 17 Liu Simin, Guo Ru, Xu Jingjun. *Photorefractive Nonlinear Optics and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2004. 223~224 (in Chinese)
- 刘思敏, 郭 儒, 许京军. 光折变非线性光学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 223~224
- 18 Duck Jong Suh, O. Ok Park, Taek Ahn *et al.*. Observation of the photorefractive behaviors in the polymer nanocomposite based on p-PMEH-PPV/CdSe-nanoparticle matrix [J]. *Optical Materials*, 2002, **21**: 365~371
- 19 Xie Rusheng, Zhao Youyuan, Li Luyin *et al.*. Orientation-enhanced photorefractive effect and holographic storage in novel azobenzene doped polymer film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 999~1004 (in Chinese)
- 谢茹胜, 赵有源, 李璐瑛等. 新型聚偶氮苯取向增强光折变效应及全息存储[J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 999~1004
- 20 R. Raschellá, I. G. Marino, P. P. Lottici *et al.*. Photorefractive grating in DR1-doped hybrid sol-gel films [J]. *Optical Materials*, 2004, **25**: 419~423
- 21 Lu Wei, She Weilong, Zhang Lingzhi. Characterization of photo-induced birefringence in the azobenzene doped polymer films[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(9): 845~849 (in Chinese)
- 陆 伟, 余卫龙, 张灵芝. 掺杂偶氮聚合物薄膜光致双折射特性[J]. 中国激光, 2002, **A29**(9): 845~849
- 22 Huang Yaping, Wang Hui, Wen Jinhui *et al.*. The ultrafast photo-induced birefringence of a new kind azobenzene side-chain polymer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 501~504 (in Chinese)
- 黄亚萍, 王 惠, 文锦辉等. 新型偶氮苯侧链共聚物的超快光致双折射特性[J]. 光学学报, 2003, **23**(4): 501~504