

含咔唑基团的有机光折变材料

花建丽^{1,2} 李俊¹ 秦金贵^{1*}

(¹ 武汉大学化学与分子科学学院 武汉 430072 ² 江西师范大学化学系 南昌 330027)

摘 要 随着信息时代的到来, 高速光通讯、光信息处理和光电子学等实用领域取得了飞速发展, 有机光折变材料在这些领域中的应用前景得到越来越广泛的重视。实验表明, 具有良好光电性的含咔唑基团的有机光折变材料显示出更好的光折变性能。本文从含咔唑侧基聚合物为主体的掺杂体系、含咔唑基团的有机聚合物多功能化体系和咔唑生色团小分子体系三方面评述了近十几年来含咔唑基团的有机光折变材料的研究进展。

关键词 咔唑衍生物 聚合物 光折变材料

Carbazolyl-containing Organic and Polymeric Photorefractive Materials

Hua Jianli^{1,2}, Li Jun¹, Qin Jingui^{1*}

(¹ Department of Chemistry, Wuhan University, Wuhan 430072

² Department of Chemistry, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027)

Abstract Organic photorefractive (PR) materials have attracted much attention in the past two decades due to their potential applications in telecommunications, optical data storage and optical information processing, etc. The materials containing carbazole components as a charge transporting function have been demonstrated to exhibit high performance photorefractive effects. In this paper, the research progress in carbazolyl-containing organic and polymeric PR materials from three ways of polymeric PR composites with PVK and PSX-Cz as the host polymer, carbazolyl-containing multifunctional PR polymeric materials and carbazolyl-containing chromophores for PR materials have been reviewed.

Key words Carbazole derivatives, Polymer, Photorefractive materials

光折变效应是光致折射率变化的简称, 其源于材料中光致电荷的产生和迁移引起的内部空间电荷场, 材料的线性电光响应通过这些电场诱导其折射率产生变化。这一现象是 1966 年贝尔实验室的 Ashkin 等^[1]在用铌酸锂(LiNbO₃)晶体进行二次谐波产生(SHG)实验时意外发现的, Chen 等^[2]首次意识到可以利用这一效应存储光学信息, 此后, 光折变材料在光学信息处理、光学数据存储、光学位相共轭和多媒体技术等领域显现巨大的潜在应用前景, 引起人们对它的极大兴趣和广泛深入的研究。

在过去三十多年, 光折变效应研究主要限于无机晶体材料。然而, 无机光折变晶体成本较高, 难以加工成面积较大的薄膜器件, 而且许多无机晶体的介电常数较大, 使得光折变品质因

花建丽 女, 39 岁, 博士后, 从事有机光电材料研究。* 联系人, E-mail: jgqin@whu.edu.cn

国家自然科学基金资助项目(20202007)

2003-11-11 收稿, 2004-03-05 接受

数难以有很大的提高，极大地限制了无机光折变晶体在生产实践中的应用。于是，人们逐渐把目光转移到有机材料上来。1990 年 ,Sutter 等^[3]首次报道了掺有 7,7,8,8-四氰基对醌二甲烷(TCNQ)的 2-环辛氨基-5-硝基吡啶(COANP)有机晶体的光折变效应，由于掺杂的有机晶体的生长较无机晶体更为困难，实用化的可能性极小。随后在 1991 年 Moerner 等^[4]发表的关于聚合物的光折变效应的报道极大地推动了这一领域的研究。十多年来，聚合物光折变的研究已经取得了许多重要进展，有些材料的品质因数已经超过了无机光折变晶体，特别是 1994 年美国 IBM 和亚利桑那大学在有机光折变材料研究工作上的合作取得了重大突破，一种具有低玻璃化温度的聚乙烯咔唑(PVK)掺杂体系的净增益参数达到 220cm^{-1} ，衍射效率也近乎达到 100%，超过了已知的绝大多数无机物^[5]，被美国《科学新闻》杂志评为当年国际光电材料重大进展之一。

大多数咔唑衍生物及含咔唑基团的聚合物都具有良好的光导电性质，并且主要以空穴传导为主，咔唑生色团小分子及含咔唑基团的聚合物光折变材料已成为光折变材料研究中的热点^[6]。本文对这方面的近展加以评述。

1 含咔唑侧基聚合物为主体的主客体掺杂体系

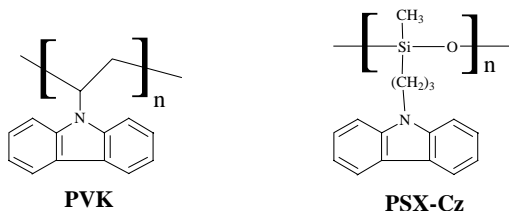
当一种材料同时具有光电导性和线性电光特性时，就会显示光折变(PR)效应。产生光折变效应必须具备四个功能组分：产生载流子的光敏剂(CG)、载流子的输运剂(CT)、载流子的俘获中心(陷阱 Trap)和具有电光特性的二阶非线性光学生色团(NLO)。通常认为陷阱是聚合物体系本身所固有的。一般在聚合物光折变材料中只含有 CG、CT 和 NLO。这些功能组分可以通过共混的形式混合在聚合物体系中，也可以通过链接的形式连在聚合物的侧链上形成多功能化或全功能化聚合物。

表 1 以 PVK 和 PSX-Cz 聚合物为主体的掺杂体系的光折变性能
Tab.1 The properties of polymeric PR composites with PVK and PSX-Cz as the host polymer

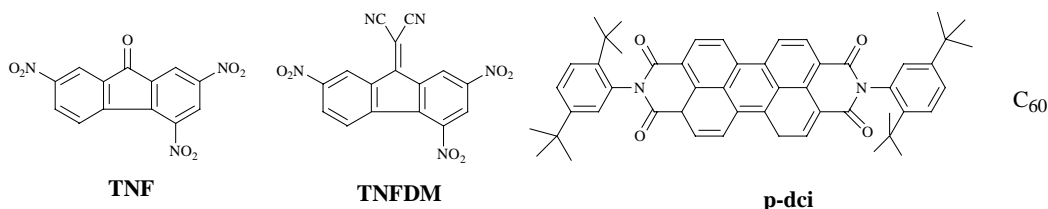
聚合物	NLO	CG	增塑剂	$\eta/\%$	Γ/cm^{-1}	$\Gamma_{\text{eff}}/\text{cm}^{-1}$
PVK	DEANST	C ₆₀		2×10^{-3}	7	
PVK	FDEANST	TNF		1×10^{-1}	8.6	7.2
PVK	PDCST	TNF		3.7×10^{-1}	7.8	5.5
PVK	MBANP	TNF		1.7×10^{-2}	2.6	1.7
PVK	MTFNS	TNF		1.2×10^{-3}	1.2	0.6
PVK	DEAMNST	TNF		1.5×10^{-1}	8.0	
PVK	DEANST	TNF		2.3×10^{-1}	5.0	
PVK	DEACST	TNF		2.0×10^{-2}	2.1	
PVK	DEABNB	TNF		9.9×10^{-3}	3.2	
PVK	DTNBI	TNF		3.8×10^{-2}	5.4	
PVK	FDEANST	p-dci		4.5×10^{-2}	2.3	
PVK	FDEANST	C ₆₀		1.1×10^{-1}	9.0	8.1
PVK	EHDNPB	TNF		60	120	117
PVK	EPNA	TNF		2×10^{-1}	22	18
PVK	DR1	TNF				140
PVK	DEANST	C ₆₀	TCP	40	133.6	
PVK	DMNPAA	TNF	ECZ	100	220	207
PVK	DHADC-MPN	TNFDm	ECZ	74		
PVK	NPADVBB	TNF	ECZ	100		
PVK	PDCST	C ₆₀	BBP	80	200	
PVK	APSS	C ₆₀	TCP	40		60
PSX-Cz	DMNPAA	TNF		6×10^{-1}		220
PSX-Cz	DB-IP-DC	TNF		5.6×10^{-1}	390	

聚乙烯咔唑(PVK)和含咔唑侧基的聚甲基硅氧烷(PSX-Cz)是良好的光电导聚合物,以它们为主体的掺杂体系得到了广泛的研究。表 1 列出了以它们为主体的聚合物光折变材料的组成及光折变性能参数^[7~28](η 表示衍射效率、 Γ 代表二波耦合(2BC)增益系数、 Γ_n 代表 2BC 净增益系数)。各功能组分的化学结构示于图 1 和图 2 中。

A: 含有咔唑侧基的光电导聚合物



B: 光敏剂



C: 增塑剂

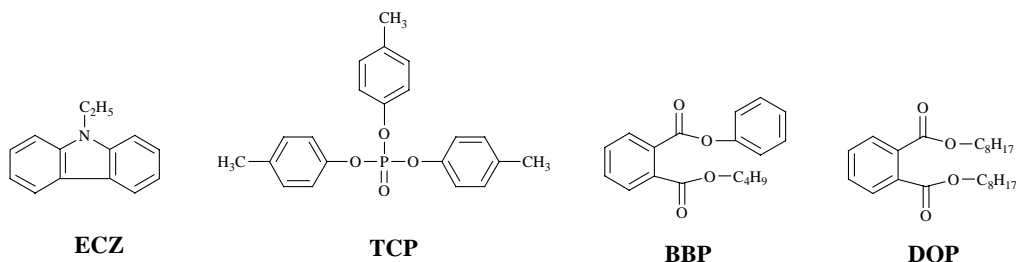


图 1 咔唑光电导聚合物 PVK、PSX-Cz、光敏剂和增塑剂的化学结构

Fig.1 Chemical structures of PVK、PSX-Cz、sensitizers and plasticizers

1992 年初,Zhang 等^[10]首次制备以 PVK 为空穴传输组分的聚合物光折变材料。Silence 等^[11]在 PVK:FDEANS:TNF 体系中首次发现了增益系数高于光吸收系数表现出净的光束耦合增益的光折变材料。Silence 等^[12]还考察了不同电光特性的二阶非线性生色团及光敏剂对材料性能的影响(表 1),发现 PVK:FDEANST 体系以 C₆₀ 作为光敏剂时具有较大的 η 和 Γ 。近来,郑锐之^[28]报道了在 PVK 体系中掺杂分散红 1、聚丁基丙烯酸甲酯和 TNF 的光折变性能,在无外加电场的情况下,其 Γ_n 为 140cm⁻¹,而在 25V/ μ m 的电场下 Γ_n 高达 470cm⁻¹,表现出相当大的光折变效应。

随着取向增强效应的发现和其机理被揭示,材料的低 T_g 被认为对获得好的光折变效应是相当有益的。因此一些研究组致力于在光电导聚合物中加入增塑剂以降低其 T_g 。Parsad 等^[14]通过改变增塑剂和提高样品的纯度,在 PVK/DEANST/TCP/C₆₀ = 60/36/3.75/0.2(重量比)掺杂体系中,获得了高的衍射效率(40%)和大的增益系数(133.6cm⁻¹)。

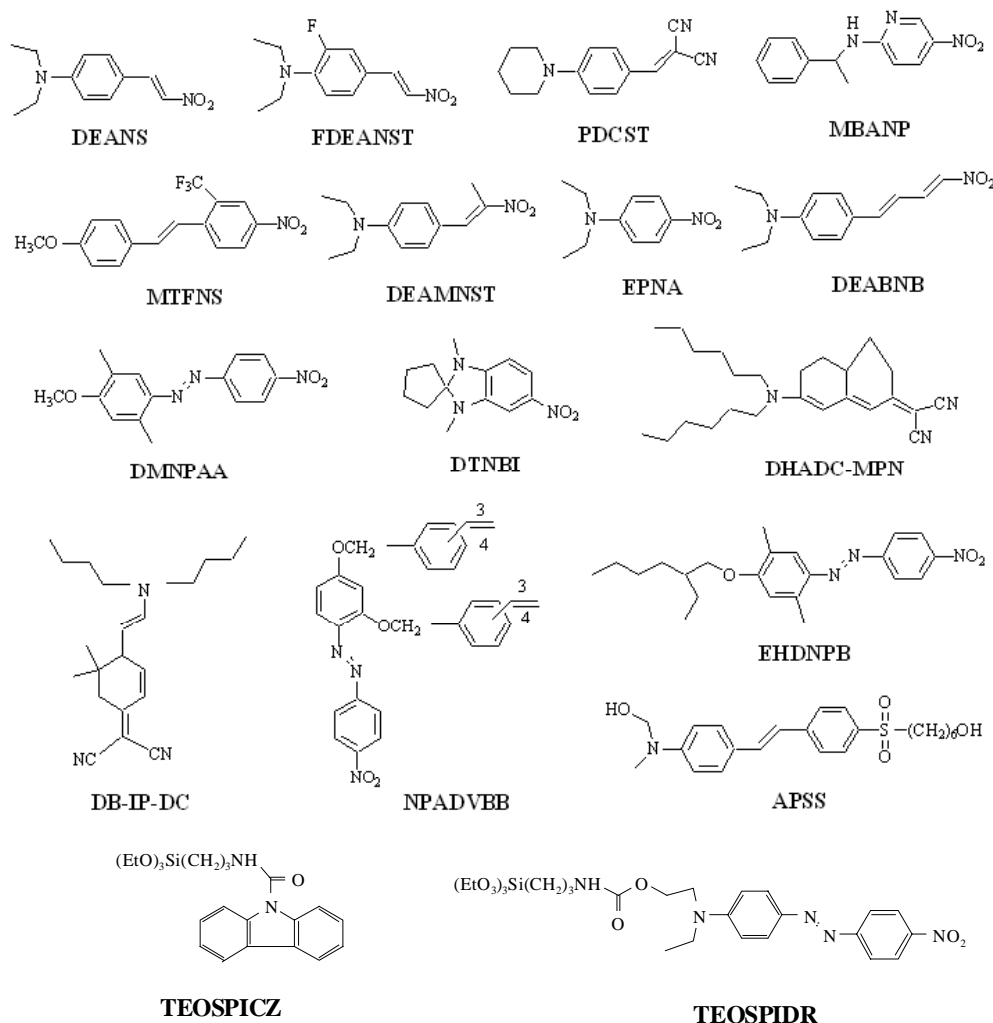


图 2 掺杂体系中的 NLO 生色团的化学结构

Fig.2 Chemical structures of NLO chromophores in PVK and PSX-Cz polymeric PR composites

迄今为止,在 PVK 掺杂体系中,光折变性能最好的体系是 Peyghambarian 等^[5]在 1994 年报道的 PVK/DMNPAA/ECZ/TNF = 33/50/16/1(重量比)体系,其净增益系数高达 207cm^{-1} ,衍射效率接近 100%。该体系的稳态衍射效率和二波耦合净增益系数两项指标远远优于无机及半导体光折变材料,充分展示了聚合物光折变材料的优越性。

有别于加入增塑剂降低 T_g 的方法,通过改变主链结构同样可以达到相同的结果。Zobel 等^[24]将咪唑基团通过一亚甲基链接到聚甲基硅氧烷(PSX-Cz)中代替 PVK 作为光电导聚合物,由于聚甲基硅氧烷链的柔性,加之咪唑基团还通过一个短柔性链与之相连,所获得的聚合物具有较低的 T_g 温度(51)。该体系也显示出非常优异的光折变性能,在工作波长 650 nm、外电场 $10\text{V}/\mu\text{m}$ 下稳态衍射效率达 60%, I_n 接近 220cm^{-1} ,获得与 Peyghambarian 等报道相似的光折变光栅。Kim 等^[27]在 PSX/DB-IP-DC/TNF = 69/30/1(重量比)体系中也有类似的报道,在 $100\text{V}/\mu\text{m}$ 电场下, I 高达 390cm^{-1} 。

1996 年 Chaput 等^[29]报道了用溶胶-凝胶法制备的有机-无机复合光折变材料,电荷传输体

(TEOSPICZ)和非线性光学组分(TEOSPIDR)结构见图 2。在无外加电场的情况下, Γ_n 最高可达 200cm^{-1} , 并有稳定的光栅记忆能力。最近 Cheben 等^[30]通过溶胶-凝胶法制备了具有中心对称结构和非中心对称结构的偶氮染料掺杂的硅玻璃光折变材料, 其对应的 Γ_n 分别为 188cm^{-1} 和 444cm^{-1} , 这一结果表明生色团的非中心对称结构或非线性光学性质并不是产生光折变效应的必需条件。

2 含卟啉基团的有机聚合物多功能体系

由于掺杂体系是一个亚稳态体系, 聚合物与小分子存在难以克服的相容性问题, 因此, 开发多功能体系是目前光折变材料研究中的一个热点。在这个体系中, 电荷输运剂和非线性光学生色团等功能组分同时键接到聚合物链上, 陷阱则被认为是聚合物体系本身所固有, 而光敏剂所需含量很小, 即使掺杂也不会产生相分离现象。另外, 单一聚合物相对而言有较高的 T_g , 极化后生色团的取向松弛较慢而使体系的电光系数较稳定。尽管这类聚合物的合成很困难, 各功能组分的随机分布也可能造成电荷运输的中断, 然而从光折变聚合物作为一种新的光电子功能材料应用的角度考虑, 单组分体系应更为有利。

第一例用于光折变效应研究的多功能聚合物是 1992 年 Peyghambarian 等^[31]通过在聚甲基丙烯酸酯侧链引入卟啉和三氰乙基卟啉制得的(图 3 中的 1), 在该体系中卟啉用于电荷输运, 三氰乙基卟啉的作用是 NLO 生色团兼光电荷产生剂。在另一个结构相似的聚甲基丙烯酸酯中(图 3 中的 2)^[32], 四波混频(FWM)衍射效率达到 6×10^{-6} 。

为了进一步减少相分离和增加生色团及电荷输运剂的浓度, Natansohn 等^[33]合成了以聚甲基丙烯酸酯为主链、以硝基偶氮卟啉为侧基的光折变聚合物(图 3 中的 3), 其侧基既可作为电荷产生剂, 又可作为光电荷输运剂以及生色团。在外电场的作用下, FWM 效率高达 25%。Prasad^[34]以聚甲基丙烯酸酯为主链, 羟乙基卟啉键接成侧链用作电荷输运剂, 一个具有二苯乙烯结构的生色团接入到侧链中形成多功能光折变聚合物(图 3 中的 4), 长的侧链烷基($n\text{-C}_8\text{H}_{17}$)用来降低聚合物的 T_g , C_{60} 作为光敏剂掺杂在聚合物体系中。在外电场作用下, FWM 衍射效率为 0.9%, 2BC 增益系数达 7cm^{-1} 。近来 Eric 等^[35]采用相似的方法, 合成了侧链键接二苯乙烯相似结构生色团的聚甲基丙烯酸酯聚合物多功能化光折变材料(图 3 中的 5), 所测衍射效率达 60%, 增益系数为 57cm^{-1} 。

Park^[36]通过阳离子开环聚合方法合成了一种新型的含有卟啉基团侧链的聚缩水甘油醚多功能化齐聚物光折变材料(图 3 中的 6), 这类材料具有很好的透明性($\lambda_{\text{max}}=346\text{nm}$, CH_2Cl_2)和高质量的光学成膜性, 在场强为 $40\text{V}/\mu\text{m}$ 下, 光电导率为 $5.56 \times 10^{-12}\text{S}/\text{cm}$ 。在 2BC 实验中, 通过非对称能量传输证实了它的光折变性, 净增益系数为 7cm^{-1} 。

Zhang 等^[37,38]首次合成了多功能化的卟啉主链光折变聚合物(图 3 中的 7), 在 $23\text{V}/\mu\text{m}$ 工作电压下 FWM 衍射效率达 1.5%, 2BC 净增益系数为 6cm^{-1} 。若在此卟啉主链聚合物侧链上键接生色团(图 3 中的 8), 则其 2BC 净增益系数高达 45cm^{-1} 。

由于聚硅氧烷主链骨架的柔性大, 因此采用 $\text{Si}-\text{O}$ 主链是获得低 T_g 光折变聚合物的重要途径之一。Belfield^[39]合成了以 型卟啉生色团为侧基的聚硅氧烷(图 3 中的 9,10), 但未报道其光折变性能。笔者也合成了两类多功能聚合物聚乙烯卟啉(PVK)和聚硅氧烷(PSX-Cz)的光折变材

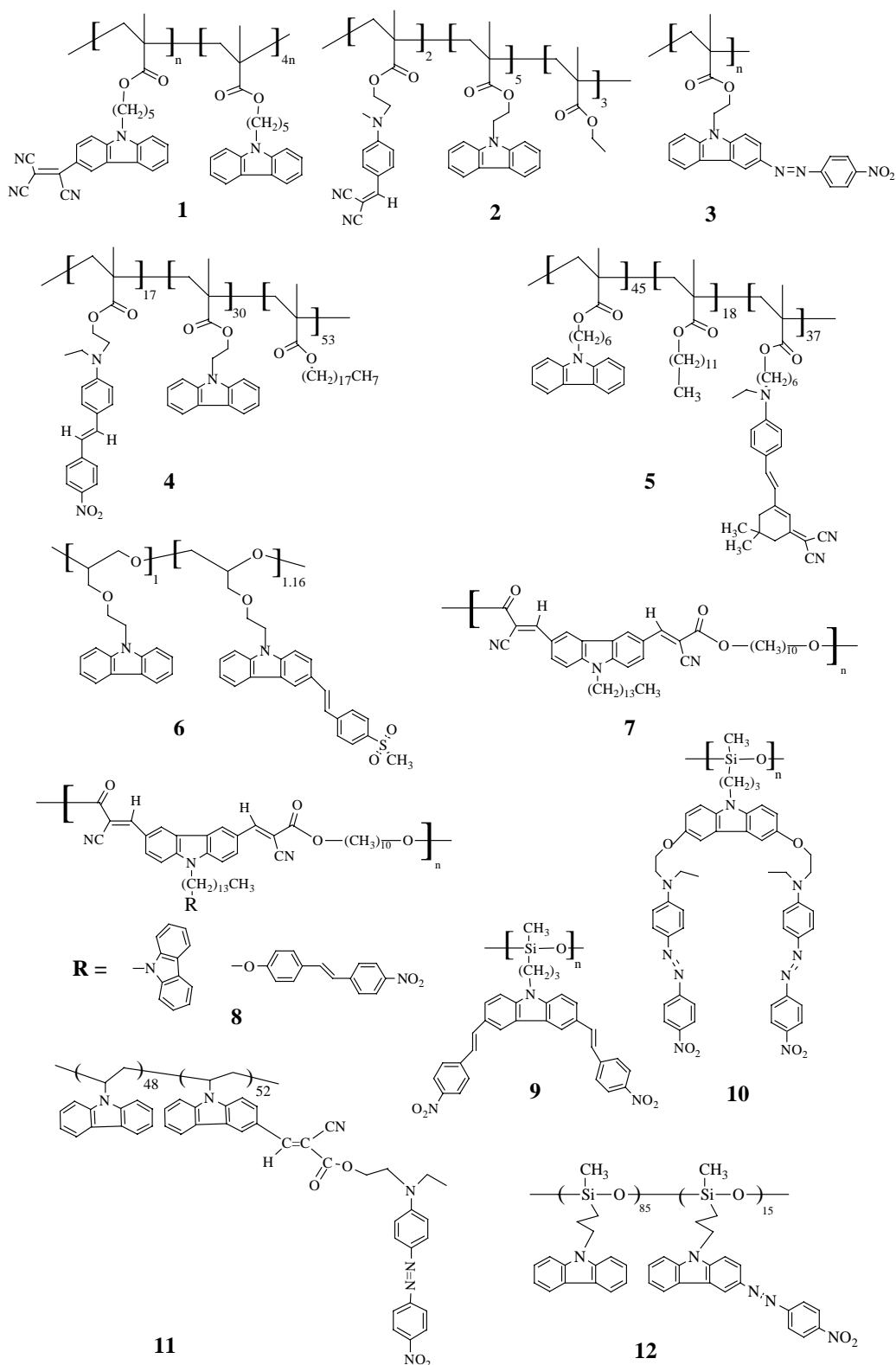


图 3 多功能含咔唑基团的有机高分子光折变材料的化学结构

Fig.3 Chemical structures of carbazoyl-containing multifunctional PR polymeric materials

料^[40,41]。聚乙烯吡唑具有良好的光电导性,含氰基乙酸酯的分散红-1 作为 NLO 生色团以侧链的形式键接到 PVK 上(图 3 中的 11),其生色团的摩尔浓度可高达 52%,经过电极化后,二阶非线性系数为 20pm/V;聚硅氧烷通过硅氢化反应将吡唑和 NLO 生色团引入到侧链中,得到了一类多功能化聚合物(图 3 中的 12)。

3 吡唑生色团小分子体系

多功能化光折变聚合物有效地解决了相分离的难题,避免了小分子的挥发,因而在提高聚合物的稳定性、耐用性以及光折变性能等方面具有很大的潜力。但是,在多功能化聚合物中,电荷输运体是挂在聚合物主链上的,由于彼此间距的影响,形成无序分布,往往会造成电荷输运缓慢或中断,因而一般光折变性能较低;而且多功能化聚合物的合成也比较复杂。所以,近来玻璃态的吡唑衍生物小分子光折变材料由于具有容易纯化、电荷输运方便和产生取向增强效应所需的低 T_g 等优势而受到关注。

俞陆平等^[42]合成了一类兼具光导性和二阶非线性光学性能的双功能化小分子生色团(图 4 中的 1),为了防止结晶和降低化合物的 T_g ,他们在分子中引入了较长的烷基链。在 633nm、57.6V/ μm 外加电场下,样品 2BC 净增益系数为 11cm⁻¹, FWM 衍射效率达 56%。近来俞陆平等^[43]还设计合成了一系列新型的含有吡唑基团的双功能生色团(图 4 中的 2),在这类分子中由于强的吸电子基能与吡唑形成电荷转移复合物,可以作为光敏剂,所以这类分子属于全功能化光折变材料范畴。其中图 4 中的化合物 2b 在 632.8nm 波长下观察到衍射效率 17%(42V/ μm)和 2BC 净增益系数 64cm⁻¹(46V/ μm);化合物 2c 在 62V/ μm 的外电场下测得 48.7cm⁻¹ 的净增益和 9% 的衍射效率。为了发展新型的具有良好柔性的无定形光折变材料,Zhang 等^[44]合成了吡唑树枝状寡聚物(图 4 中的 3),在 2BC 实验中,化合物 3c 的增益系数为 11.8cm⁻¹。Zhang 等^[43]还合成了吡唑共轭三聚物多功能化光折变材料(图 4 中的 4),化合物 4a 和 4b 显示出较好的光电导性,在场强为 30V/ μm 下,光电导灵敏度分别为 1.2 $\times 10\text{cm}^{-1}/\text{W}$ 和 1.22 $\times 10\text{cm}^{-1}/\text{W}$,150 μm 厚的膜用于 FWM 和 2BC 实验,所测衍射效率依次为 13% 和 18%,净增益系数分别是 26.8cm⁻¹ 和 76cm⁻¹。

Strohriegl 等^[46]合成了玻璃态含有吡唑取代的三苯胺类多功能化小分子光折变材料(图 4 中的 5),掺杂 28% 的邻苯二甲基二异辛酯增塑剂(DOP)和 1% 的 C₆₀ 光敏剂制成的 40 μm 厚的薄膜试样,在 80V/ μm 电压下,二波耦合增益最高达 90cm⁻¹,衍射效率为 27%,响应时间仅为 30ms,这是目前文献报道的具有最快响应的有机光折变材料。

4 结语

光折变聚合物由于其高光折变性能、易制备、价格低等优点,一经问世就引起了人们的极大兴趣。已经有许多有机光折变材料在性能上完全可以与无机光折变材料相媲美,甚至超过了无机光折变材料。但是真正使光折变聚合物走向实用还有很长一段路要走。因为近几年的研究中,发现许多新型有机光折变材料,它们各具特点:多组分混合光折变材料存在相分离的缺点,限制了材料光折变品质因数的提高;光电导聚合物材料有 T_g 低,能够获得超高衍射效率和 2BC 增益系数,但是样品薄膜需要外加强电场,且薄膜的热稳定性差和机械强度低,信息存储的暗

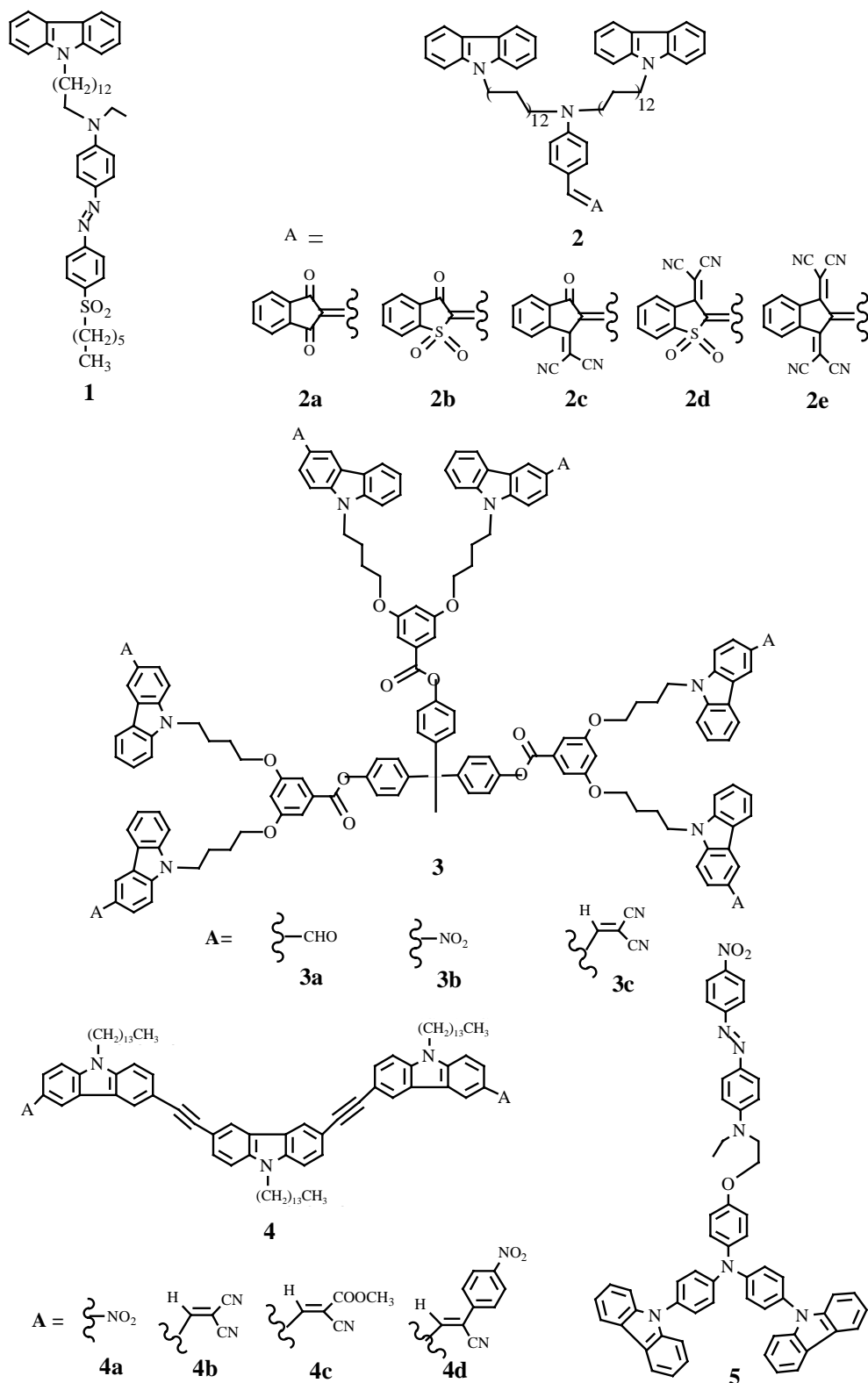


图 4 咔唑生色团小分子光折变材料的化学结构

Fig.4 Chemical structures of carbazoyl-containing chromophores for PR materials

寿命短；多功能化聚合物有效地解决了相分离的难题，但是其衍射效率和 2BC 增益系数却较小，据认为这是由于链接在聚合物骨架上的二阶生色团被固定，而不能更好取向所致，同时也有极化电压高的缺点，因此降低外加电场仍然是一个需要解决的问题；全功能型小分子材料由于其制备简单，成份单一，性能优良，是一种有前途的材料。另外，聚合物分子的设计与合成方法还需进一步优化、简单化，这一点对多功能化聚合物来说尤为重要。聚合物的光折变机制还需要人们不断地探讨和完善，因为只有了解了其机理，才能为分子的设计提供可靠的依据，制得性能更好的化合物。

值得一提的是，无机-有机复合光折变材料是近年刚出现的一类新型材料，具有好的热稳定性、机械强度、光学均匀性以及稳定的光栅记忆能力，无需外加电场就可以产生显著的光折变效应，是一类很有应用前景的光折变材料。另外，合成适用于不同波段的光折变材料也是一个发展方向，国际上已经展开了对红外波段的有机光折变材料研究。

参考文献

- [1] A Ashkin, G Boyd, J M Dziedzic et al. Appl. Phys. Lett., 1966, 9: 72~75.
- [2] F S Chen. Appl. Phys. Lett., 1968, 13: 223~224.
- [3] K Sutter, J Hulliger, P Gunter. Solid State Commun., 1990, 74(8): 867~869.
- [4] S Ducharme, J C Scott, R J Twieg et al. Phys. Rev. Lett., 1991, 66: 1864~1849.
- [5] K Meerholz, B L Volodin, B Kippelen et al. Nature, 1994, 371: 497~499.
- [6] Q Wang, L Wang, L Yu. Macromol. Rapid Commun., 2000, 21: 723~729.
- [7] 刘思敏, 郭 儒, 凌振芳. 光折变非线性光学. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [8] Y Zhang, Y Cui, P N Prasad. Phys. Rev. B, 1992, 46: 9900~9912.
- [9] M C Donckers, S M Silence, C A Walsh et al. Opt. Lett., 1993, 18: 1044~1046.
- [10] S M Silence, J C Scott, J J Stankus et al. J. Phys. Chem., 1995, 99: 4096~4102.
- [11] G G Malliaras, V V Krasnikov, G Hadzioannou. Appl. Phys. Lett. 1994, 65(3): 262~264.
- [12] M E Orczyk, B Swedek, J Zieba et al. J. Appl. Phys., 1994, 76(9): 4995~4998.
- [13] B Kippelen, S R Marder, E Hendrickx et al. Science, 1998, 2279: 54~57.
- [14] E Hendrickx, J Herlocher, J L Maldonado et al. Appl. Phys. Lett., 1998, 72(14): 1679~1681.
- [15] J Sandalphon, F Wang, B Kippelen et al. Appl. Phys. Lett., 1997, 71(7): 873~875.
- [16] E Hendrickx, B L Volodin, D D Steele et al. Appl. Phys. Lett., 1997, 71(9): 1159~1161.
- [17] E Hendrickx, J F Wang, J L Maldonado et al. Macromolecules, 1998, 31: 734~739.
- [18] A G Jepsen, C L Thompson, R J Twieg et al. Appl. Phys. Lett., 1997, 70(12): 1515~1517.
- [19] A G Jepsen, C L Thompson, W E Moerner. Opt. Lett., 1997, 22(12): 874~876.
- [20] A G Jepsen, C L Thompson, R J Twieg et al. J. Opt. Soc. Am. B, 1998, 15(2): 901~912.
- [21] A G Jepsen, C L Thompson, W E Moerner. Opt. Commun., 1998, 145: 145~149.
- [22] B Swedek, P N Prasad, Y Cui et al. Proc. SPIE, 1996, 2850: 89~92.
- [23] A M Cox, R D Blackburn, D P West et al. Appl. Phys. Lett., 1996, 68: 2801~2803.
- [24] O Zobel, M Eckl, P Stroehriegel et al. Adv. Mater., 1995, 7: 911~914.
- [25] C Poga, P M Lundquist, V Lee et al. Appl. Phys. Lett., 1996, 69: 1047~1049.
- [26] W S Jahng, D Yoo, H Moon et al. Mol. Cryst. Liq. Cryst., 2000, 349: 1~5.
- [27] H Chun, I K Moon, D H Shin et al. Chem. Mater., 2001, 13: 2813~2821.
- [28] R Z Zheng, Y Y Zhao, K Min et al. Chin. Phys. Lett., 2002, 6: 795~797.
- [29] F Chapat, D Riehl, J P Boilet et al. Chem. Mater., 1996, 8: 312~318.
- [30] C Pavel, M Francisco, D J Worsfold et al. Nature, 2000, 408: 64~66.
- [31] B Kippelen, K Tamura, N Peyghambarian. Phys. Rev. B, 1993, 48(15): 10710~10718.
- [32] T Kawakami, N Sonoda. Appl. Phys. Lett., 1993, 62: 2167~2170.
- [33] M S Ho, C Barrett, J Paterson et al. Macromolecules, 1996, 29: 4613~4618.
- [34] C F Zhao, C K Park, P N Prasad. Chem. Mater., 1995, 7: 1237~1242.
- [35] D V Steenwinckel, C Engels, E Gubbelsmans et al. Macromolecules, 2000, 33: 4074~4081.
- [36] J Sohn, S Y Park, H Moon et al. Reactive and Functional Polymers, 2000, 45: 109~115.
- [37] Y D Zhang, T Wada, L Wang et al. Chem. Commun., 1996, 2325~2326.

- [38] Y D Zhang, T Wada, H Sasabe et al. *J. Mater. Chem.*, 1998, 8(4): 809~815.
- [39] K D Belfield, C Chinna, O Najjar et al. *Macromolecules*, 1998, 31: 2918~2925.
- [40] J Luo, J Qin, H Kang et al. *Chem. Mater.*, 2001, 13: 927~932.
- [41] J Li, P Ren, C M Zhan et al. *Polym. International*, 1999, 48(6): 491~494.
- [42] Q Wang, A Gharavi, W Li et al. *Polymer Preprints*, 1997, 38(2): 516~517.
- [43] Q Wang, L Wang, H Saadeh et al. *Chem. Commun.*, 1999, 1689~1690.
- [44] T Wada, L Wang, Y D Zhang. *Nonlinear Opt.*, 1996, 15: 103~107.
- [45] Y D Zhang, T Wada, L Wang et al. *Tetrahed. Lett.*, 1997, 38: 1785~1786.
- [46] C Hohle, U Hofmann, S Schlöter et al. *J. Mater. Chem.*, 1999, 9: 2205~2212.