

聚合物光纤放大器

梁 浩, 李增昌, 张其锦^{*}

(中国科学技术大学高分子科学与工程系, 合肥 230026)

摘要: 聚合物光纤是一种新型的信号传输介质。本文综述了聚合物光纤放大器的研究现状, 着重对有机染料和稀土掺杂的聚合物光纤的特性进行了深入的讨论。

关键词: 聚合物光纤放大器; 有机染料; 稀土; 增益

前言

近年来, 随着信息高速公路和国际互连网的迅速发展, 光纤光缆作为传输的主干线得到空前的重视, 但在光纤入户方面却遇到了困难。单模的石英光纤由于纤芯直径一般在 $5\mu\text{m}$, 两根光纤接续时几个微米的微小偏差会引起严重的耦合损耗。在多连接点的光互连和网络的终端区域, 将石英光纤精密对接所需的高昂费用使得光纤入户费用大大提高。而聚合物光纤(POF)由于其芯径大、耐挠曲性能优良、光耦合不需微调以及接续容易, 因此在局域网、数据链路及多节点总线网中将会作为主要的传输介质得到广泛应用^[1~3]。

在光纤系统中, 光纤放大器具有如下作用: 替代传统的光-电-光中继器, 对光信号起中继放大作用, 使超长距光纤传输得以实现; 作为光发射机的后置功率放大器, 以提高光端机的放射功率; 用做光接收机的前置放大器, 大大改善接收机的灵敏度。在石英光纤领域, 已经开发出掺 Er 的光纤放大器, 由于其信号增益效果显著和易于与光纤网络相连接, 已成功地替代了光电子放大器。随着聚合物光纤及其在接入网中的应用不断发展, 聚合物光纤放大器正在成为人们关注的焦点, 很多研究小组已开始了研究工作, 本文特对这一新兴领域的重要进展进行讨论。

1 光纤放大器的放大原理

以下以三能级掺 Er 石英光纤放大器为例介绍光纤放大器的基本原理。如图 1 所示, 掺 Er 石英光纤放大器产生光放大效应的能级有三个: 高能态、亚稳态和基态。高能态与基态之间的能量差与泵浦光子相同, 亚稳态和基态之间的能量差与信号光子相同。

当注入足够能量的泵浦光, 就可以将大部分处于基态的 Er^{3+} 离子抽运到高能态, 处于高能态的 Er^{3+} 离子又迅速无辐射转移到亚稳态上。当信号光子通过光纤时, 与 Er^{3+} 离子相互作用发生受激辐射效应, 产生与自身完全相同的光子, 这时通过掺 Er 光纤传输的信号光子迅速增多, 产生信号

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50025309)

作者简介: 梁浩(1972—), 男, 湖北汉川人, 中国科学技术大学高分子科学与工程系在读博士, 研究方向: 稀土掺杂聚合物光纤;

^{*} 通讯联系人。

放大作用。

对于聚合物光纤,引入可以产生荧光的物质,就有可能制备出具有信号放大作用的聚合物光纤放大器。根据掺杂荧光物质的种类,目前主要包括掺杂染料和掺杂稀土化合物两类体系。

2 有机染料掺杂体系

有机染料具有很大的吸收和发射截面,如若丹明 B 在聚甲基丙烯酸甲酯中的截面要比 Er^{3+} 在 $\text{GeO}_2-\text{SiO}_2$ 中大 10000 倍^[1]。而且有机激光染料的荧光光谱可以覆盖整个可见光区域。当其荧光和吸收光谱被适当分离,再结合聚合物光纤芯径较大的特点,便有可能使用相当低的掺杂浓度制备出掺杂有机染料的聚合物光纤放大器,其在可见光区域任何波长处都具有高效的放大作用^[1~3]。图 2 为一个染料分子的能级示意图^[2,3]。

图 2 中每一电子能级都包括连续的振动和转动能级。染料的吸收带为基态 S_0 到第一激发态 S_1 的跃迁,相反的过程,即从 S_1 到 S_0 的跃迁为产生荧光的自发发射和受激发射。当用一强光源的泵浦有机染料掺杂的聚合物光纤放大器,染料分子通常被激发到单重态较高的能级 S_2 ,并在微微秒内弛豫到 S_1 最低的振动能级,即受激发射的亚稳态能级。由第一激发单重态最低振动能级到基态较高振动能级的允许跃迁给出一高的放大系数。然而还存在着其他一些不利于光放大的过程。这些过程包括相同多重态能态之间的无辐射跃迁(内转换)和不同多重态能态之间的无辐射跃迁(系间窜跃)。由最低三重态 T_1 到基态 S_0 的辐射跃迁称为磷光。最

低三重态上粒子数的增加有两个后果:(1)使激发单重态的粒子数减少,从而减小了放大系数;(2)增加了三重态-三重态之间的吸收损耗。

在聚合物光纤放大器中使用的染料必须符合以下几个条件^[4]:

(1)染料在所掺杂的聚合物基体中要有适当的荧光量子产率,因为这一特性直接关系受激发射可能性的多少;

(2)要有高的光化学稳定性,因为聚合物光纤放大器的结构要求染料能经受连续操作时的多次激发循环;

(3)在染料的荧光和吸收光谱间的重叠很小,因为在重叠区域由于染料自身的吸收导致光放大很难发生;

(4)染料必须能吸收泵浦源的辐射并能保持激发发射所需的粒子数反转;

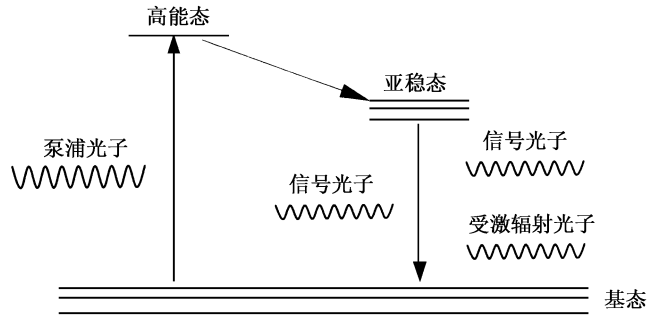


图 1 光纤放大器原理图

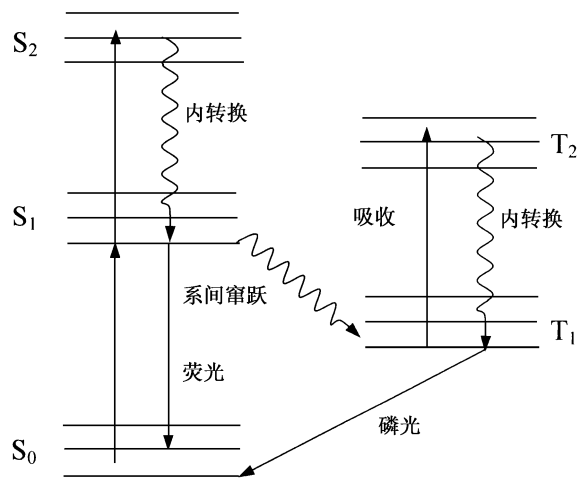


图 2 染料分子能级示意图

(5) 在所选用的聚合物基体中有足够的溶解度和热稳定性。

根据上述要求, Tagaya^[4,5]等选用若丹明 B 使用界面凝胶聚合技术首次制备出掺杂有机染料的梯度折射率聚合物光纤放大器。用 690W 泵浦源对掺杂光纤泵浦(若丹明 B 的掺杂浓度为 0.0001%(wt), 光纤长 0.5m, 芯径 0.25mm), 在 591nm 信号波长处观察到 27dB 的增益(输入信号为 0.85W 被放大到 420W), 泵浦能量对信号放大的转换效率高 于 60%。在掺 Er 的石英光纤放大器中是不可能得到这样高能量的放大, 因为石英光纤其芯径很小(5~10 μ m), 很容易发生介电击穿。他们还使用简单的三能级系统模型对上述光纤放大器的增益性质进行了理论推导和计算^[1], 结论表明实际得到的增益数值与理论计算值符合很好。此外, Peng^[6]等还制备出阶跃型的若丹明 B 掺杂聚合物光纤放大器, 所获得的增益为 23dB。

尽管使用有机染料制备聚合物光纤放大器获得了成功, 但有机染料作为增益介质也有其固有的缺点^[7]:

- (1) 若丹明类染料, 如若丹明 B, 由于具有羧基基团, 在甲基丙烯酸甲酯中容易异构成无色的内酯, 从而削弱了增益作用;
- (2) 典型的具有大的吸收和发射截面的有机染料在甲基丙烯酸甲酯和其聚合物中的溶解性都不佳;
- (3) 在自由基聚合的过程中, 有机染料容易分解。如噻嗪-4-高氯酸盐 [Oxazine 4perchlorate (O4PC)], 在制备聚合物光纤放大器的自由基聚合过程中, 几乎所有掺杂的染料分子都分解了, 这种分解使增益作用削弱;
- (4) 由于对有机染料在聚甲基丙烯酸甲酯中的吸收光谱和荧光光谱报道很少, 使得确定最佳的泵浦波长和信号波长变得比较困难。

针对有机染料的上述缺点, Tagaya^[7]等开发出新的染料掺杂聚合物光纤放大器制备技术, 并研究了一些染料在 PMMA 中的吸收和荧光光谱。他们的成果主要包括以下几方面。

(1) 防止若丹明类染料异构成内酯结构

若丹明 B 的两种异构体, 两性离子 B 和内酯结构 C, 它们之间存在着图 3 中所示的平衡:

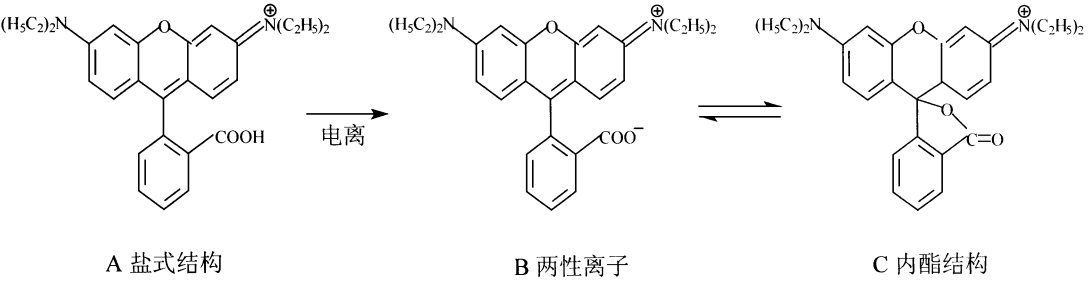


图 3 若丹明 B 的异构化平衡

若丹明 B 不溶于无水的甲基丙烯酸甲酯, 但可溶于含微量水份的甲基丙烯酸甲酯。若丹明 B 的盐式结构 A 在微量水的作用下电离为两性离子 B, 由于在弱极性溶剂中两性离子 B 和内酯结构 C 之间的平衡倾向于 C, 因此几乎所有的两性离子都转化为内酯结构。两性离子 B 可作为增益介质, 而内酯结构 C 根本不能作为增益介质。但随着正丁基硫醇加入, 可发现荧光强度随之增强, 到一定时间后趋向稳定, 这说明正丁基硫醇可使平衡向两性离子结构 B 移动, 阻止生成无色的内酯

结构。这是因为加入正丁基硫醇后,甲基丙烯酸甲酯的酸度增加。事实上加入少量乙酸也得到类似的结果。由于在制备过程中正丁基硫醇同时作为链转移剂调节分子量,因此采用这种方法增强染料的增益作用不会影响聚合物光纤放大器的制备过程。该方法也可用于其它含自由羧基的若丹明类染料如若丹明 110 和若丹明 19。

(2) 增强有机染料在甲基丙烯酸甲酯中的溶解度和防止染料在聚合过程中降解

加入微量极性较高的试剂可增加染料在甲基丙烯酸甲酯中的溶解度。根据这一点,选用二甲亚砜(DMSO)来增加染料的溶解度,一是其极性较强,偶极矩为 3.9D;另一点就是其沸点为 189℃,可适应预制棒热处理和拉伸光纤的过程。除了增加有机染料的溶解度外,DMSO 的加入还可以有效防止染料在制备光纤放大器的自由基聚合过程中分解。表 1 为添加 DMSO 前后各种染料在甲基丙烯酸甲酯中的溶解度和分别添加 DMSO 和水聚合时染料的分解率,从中可看出 DMSO 对染料有显著的增溶和防止分解的作用。

表 1 有机染料的溶解度及聚合时的分解率

染料	在 MMA 中溶解度 /wt		聚合时染料分解率 /%	
	未加入 DMSO	DMSO /1%(wt)	DMSO /1%(wt)	H ₂ O /0.03%(wt)
若丹明 B	不溶	$> 20 \times 10^{-7}$	52.8	75.7
若丹明 6G	不溶	$> 5 \times 10^{-7}$	37.5	66.5
O4PC	$< 10 \times 10^{-7}$	$> 100 \times 10^{-7}$	42.8	100.0
DCM	$< 10 \times 10^{-7}$	$> 20 \times 10^{-7}$	56.0	68.1

* DCM: $[-4\text{-Dicyanmethylene-2-methyl-6-(p-dimethylaminostyryl)-4H-pyran}]_n$ 4-氰甲-2-甲基-6-对二苯基-氨基苯乙烯基-4H-吡喃

据认为在自由基聚合过程中,有机染料的分解是受到引发所产生的自由基攻击的结果,而众所周知 DMSO 是一种阻聚剂,因此可以假定在聚合时,DMSO 分子聚集在染料分子周围作为阻聚剂以保护染料分子不受自由基的进攻。不过对这一假定还有待进一步的研究。

采用上述技术并根据对有机染料在 PMMA 中发射和吸收截面的计算所得到的数据^[9],用双频 Q 开关 Nd:YAG 激光器在 532nm 对若丹明 B 掺杂的聚合物光纤(芯径为 500 μm,长 90cm)进行泵浦,泵浦功率为 3.5kW,当信号输入功率为 0.3W 时,输出信号被放大到 1200W,所获得的增益为 36dB。这是目前所制备出的增益最强的聚合物光纤放大器。此外利用同样的技术还制备出掺杂若丹明 6G 的聚合物光纤激光器^[10]。

在聚合物光纤放大器这样的固态装置中,由于染料不能被循环,因此染料的光稳定性是一个严重的问题。一般用染料的光致褪色来表征光稳定性。有两种机理^[8]可以导致光致褪色,一种是染料分子吸收光源发出的光发生光致化学反应,导致染料褪色;另一种是热效应导致染料分子生色团的功能键改变或断裂。Tagaya^[7]等认为,由于在聚合物光纤中染料分子的浓度很低(一般为几十万分之一),染料分子的能量可以得到有效的释放,因而可以抑制导致染料分解的热效应^[3]。他们使用 2.7kW 的泵浦功率以 10Hz 的重复率对若丹明 B 掺杂的聚合物光纤放大器连续泵浦 10h,增益仍维持在 33dB 而没有观察到掺杂染料的光降解。但 Peng^[8]等对若丹明 6G、若丹明 B 和亚甲基吡咯掺杂的聚合物光纤的光稳定性进行过研究,发现当使用 Ar 激光器,用 514nm 连续波照射样品,样品的荧光强度随时间而明显减小。这说明掺杂染料的聚合物光纤放大器如果处在连续工作的环境中,是很难维持稳定的增益性能的。因此,虽然有机染料掺杂的聚合物光纤放大器可以获得大的信号增益,但如何提高其光稳定性仍是一个迫切需要解决的问题。

3 稀土掺杂体系

稀土元素由于 4f 电子处于内层能级, 被 S 和 P 轨道有效屏蔽, 亚稳态间的 4f→4f 跃迁在荧光光谱上呈现尖锐的线状且具有较长的激发态寿命, 构成了其发光的独特优势。比较早提出将稀土引入聚合物体系制备光放大器的是 Keil^[11] 和 Chen^[12, 13] 等人。Keil 等将乙酰丙酮铒[Er(AcAc)₃] 掺杂到甲基丙烯酸甲酯和苯乙烯的共聚物中, 虽然没有观察到荧光现象, 但发现稀土在聚合物中可以获得比在石英中高得多的掺杂浓度, 因此有可能用来制备结构更为紧凑的光放大器。而 Chen 等将 NdCl₃ 掺杂到一种亲水性的聚合物基体中首次制备出单模阶跃型聚合物波导管放大器, 所获得的增益为 8.5dB, 之后又将 NdCl₃ 掺杂到聚酰亚胺中, 制成 5cm 长的槽式波导管, 在 1060nm 处获得了 5.4dB 的增益^[14]。因此将稀土元素作为荧光材料引入到聚合物光纤中, 可望能制备出具有信号放大效应的聚合物光纤放大器。

将稀土掺杂到聚合物体系中主要有两种方法, 一种是将稀土化合物直接溶解在单体中, 然后加入合适的引发剂, 单体溶液进行光聚合或热聚合形成均匀的聚合物掺杂体系^[15]; 另一种方法是将稀土化合物和纯的聚合物一同溶解在共溶剂中, 然后将溶剂蒸发, 得到掺杂的聚合物^[16, 17]。然而, 与前一种方法相比, 后一种方法有着不可避免的缺点, 即在掺杂体系中残留的溶剂会导致无辐射弛豫, 进而产生猝灭效应, 因此目前制备稀土掺杂的聚合物光纤主要采用前一种方法, 所掺杂的稀土化合物主要有稀土 β-酮螯合物和稀土的辛酸盐类。

3.1 稀土 β-二酮螯合物

使用稀土螯合物作为增益介质是因为其具有长的荧光寿命、在聚合物基体中高的溶解度以及没有显著的浓度猝灭等优点^[18]。如在无机的石英材料中, 稀土离子的溶解极其有限且在较低浓度(约 0.01%(wt)) 就会发生浓度猝灭现象, 而稀土螯合物由于稀土离子周围被有机配体所包围, 可以与聚合物基体很好的相容, 因而有较高的掺杂浓度(约 1%(wt)), 而不会产生浓度猝灭^[19~22]。Koppen^[20] 等发现 Sm 的苯甲酰三氟丙酮的螯合物在 PMMA 中即使掺杂浓度高达 10%(wt), 也未观察到明显的成簇和亚稳态寿命减小。此外, 由于在光纤中泵浦光被限制在芯层, 很容易达到所需的粒子数反转, 因此再加上高的掺杂浓度, 使得只需一段较短长度的光纤就可能产生高的增益。

Kobayashi^[19, 23] 等对 Eu 的各种 β-二酮的螯合物在梯度折射率聚合物光纤(GIPOF) 中的掺杂进行了研究。之所以选择 Eu 作为研究对象是基于 Eu 离子在 614nm 处的激发正好处于 PMMA 光纤的低损耗区, 另外如果在制备过程中其螯合物没有分解或解离的话, 其激发所需的能量可以由有机配体传递。作为配体的 β-二酮包括三氟乙酸丙酮[Trifluoroacetylacetone(TFA)]、六氟乙酰丙酮[Hexafluoroacetylacetone(HFA)]、噻吩甲酰三氟丙酮[Thenoyltrifluoroacetylacetone(TTFA)] 和二苯甲酰甲烷[Dibenzoylmethide(DBM)], 所合成的 Eu 螯合物均含有三个配体, 它们的结构见图 4。

由于存在有机配体, 这些螯合物在 350nm 处都有很强的吸收带, 在这一吸收带吸收的能量被很快传递给分子中的 Eu 离子, 使其发出 614nm 处的荧光。有机配体的化学结构对于螯合物的荧光性质有很大的影响。表 2 为掺杂 TPP(磷酸三苯酯) 和未掺杂 TPP 的 Eu 螯合物中 Eu 离子在 614nm 处的荧光强度和激发态 5D₀ 寿命。

从表 2 中可以看出与其他配体的螯合物相比, Eu(HFA)₃ 表现出较强的荧光强度和较长的激发态寿命, 这是因为其配体、取代基结构中仅有 C—F 键, 而 C—F 键的振动能量要小于 C—H 键, 因此无论是配体还是稀土离子的电子能级发生无辐射弛豫导致荧光猝灭的可能性都小很多。此外, 配

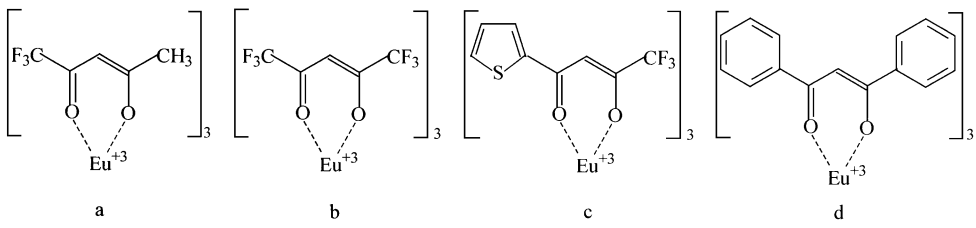


图 4 Eu 螯合物结构

a—Eu(TFA)₃; b—Eu(HFA)₃; c—Eu(TTFA)₃; d—Eu(DBM)₃

体结构还对配体到稀土离子的能量传递产生影响。一方面,配体的取代基对其三重态能级的位置有影响,当配体三重态能级与稀土离子较高能级相匹配时才能发生有效的能量传递。另一方面,取代基通过共振和诱导效应对烯-酮结构的氧原子电子云产生影响,从而影响稀土离子和配位氧原子之间配位键的共价性以及通过这些键传递能量的难易程度。因此,高电负性的基团如 CF₃,可以使有机螯合物所吸收的能量向中心稀土离子转移。

表 2 螯合物中 Eu 离子在 614nm 处的荧光强度和激发态⁵D₀ 寿命

螯合物	未掺杂 TPP		掺杂 TPP	
	荧光强度/a. u	⁵ D ₀ 寿命/ms	荧光强度/a. u	⁵ D ₀ 寿命/ms
Eu(TFA) ₃	22	0.31	43	0.45
Eu(TFA) ₃	128	0.39	322	0.61
Eu(TTFA) ₃	51	0.31	67	0.40
Eu(DBM) ₃	89	0.37	195	0.37

从表 2 中还可以看出,加入形成梯度折射率的小分子掺杂剂 TPP 可以有效增强荧光强度和激发态寿命,这一点可以从稀土离子的配位情况加以解释。稀土离子的典型的配位数一般为 8 或 9,当为这样的配位结构时,配体可将稀土离子包围与外界环境隔离,这对于发光是有利的^[19]。而上述螯合物的配位数均为 6,因此可以认为小分子掺杂剂 TPP 参与了对稀土离子的配位,从而使荧光增强。研究发现^[18],使用氙闪光灯对上述荧光最强的 Eu(TFA)₃ 掺杂梯度折射率聚合物光纤(掺杂量为 1%(wt) 长度为 70cm)进行侧面泵浦,可产生超荧光现象,这表明稀土螯合物掺杂的聚合物光纤将有可能制成光纤放大器。

在大多数有机基体中,稀土离子易发生无辐射弛豫,这主要是由含较轻原子(尤其是 H 原子)化学键的高频振动造成的。采用氘代和氟代的材料可以减小无辐射弛豫,从而可以抑制稀土离子辐射跃迁的荧光猝灭现象。因此最近 Kuriki^[24,25] 等使用全氘代和氟代的原料——氘代聚甲基丙烯酸甲酯(d8-PMMA)和氘代十氟庚二酮的稀土螯合物 Nd(DFA-D)₃、Pr(DFA-D)₃、Er(DFA-D)₃ 制备出相应的掺杂聚合物光纤。研究表明,在聚合物光纤中引入适量的稀土螯合物(含量为 0.5(wt))并不会显著增大光纤的损耗。该类光纤在可见光和近红外区域有强的特征吸收谱带。由于具有不对称配体的 Nd 螯合物 Nd(DFA-D)₃ 有⁴I_{9/2}→⁴G_{5/2}+²G_{7/2}跃迁(58nm)的强吸收,当使用双频 Q 开关 Nd:YAG 激光泵浦染料激光器在 580nm 作为泵浦源对 Nd(DFA)₃ 掺杂光纤进行泵浦,用光电二极管首

次观察到 1060nm 处的荧光衰减曲线,用计算机进行最小二乘法拟合,得到 Nd 离子的荧光寿命为 6.24 μ s。这一结果对将来设计聚合物光纤放大器会有帮助。

3.2 稀土的辛酸盐

另一种掺杂稀土的聚合物光纤,为掺杂稀土辛酸盐的聚合物光纤,已有报道^[26-28] 并对掺杂辛酸铽的体系进行了较深入的研究。图 5 为稀土辛酸盐的结构:

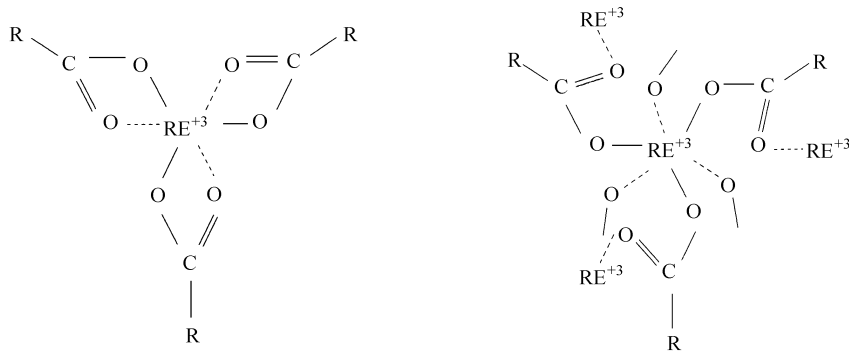


图 5 稀土辛酸盐的结构
a—双齿螯合结构; b—双齿桥式结构

掺杂 Nd³⁺ 的聚合物光纤^[26], 其荧光发射处于 575 ~ 600nm 范围, 使用 532nm 的绿光对其泵浦 (掺杂浓度为 0.0007%(wt), 光纤长度为 15cm)。在 1W 的泵浦辐射下, 得到 60 μ W 的输出。采用氩离子激光器在 514.5nm 处对掺 Nd³⁺ 的聚合物光纤泵浦 (掺杂浓度 0.0022%(wt), 芯径 0.6mm, 长度 250mm), 发现了该光纤的放大的自发辐射现象 (ASE)^[27]。在泵浦功率低于 85mW 时, 自发辐射强度与泵浦功率成线性关系; 当泵浦功率超过 85mW 时, 自发辐射强度非线性的迅速增加。由此确定放大的自发辐射的阈值泵浦功率为 85mW。放大的自发辐射现象是稀土掺杂聚合物光纤具有进一步制成聚合物光纤放大器的基础。

此外, 还对掺杂在 PMMA 中的 Nd³⁺ 的光谱性质和团簇结构进行了研究^[28]。发现在 PMMA 固体介质中 Nd³⁺ 的吸收光谱具有兰移现象。与溶液体系相比, 聚合物固体的粘滞流动势垒不可忽略, 它可迫使分子内的化学键发生畸变、扭曲, 造成掺杂的 Nd³⁺ 的吸收能级加大, 吸收光谱出现兰移。结合 Nd³⁺ 掺杂 PMMA 的内耗谱研究, 发现在低浓度掺杂条件下, 掺杂聚合物的玻璃化转变温度 (T_g) 并不随着浓度的提高而上升, 而是出现了不规则的变化。这是由于形成了一种新的稀土离子团簇所造成的。稀土掺杂聚合物光纤的光谱研究同样证明了这样一种离子团簇的存在。

3.3 稀土掺杂光纤放大器的新结构

对于稀土掺杂的体系, 如采用连续波激光器同轴激发使光纤放大器能有效的工作, 在芯层就会有高的泵浦能量密度。即使泵浦的能量在 1W 左右, 所产生的热量也足以使聚合物光纤融化。为此 Kazuhito^[29] 提出了一种新的稀土掺杂聚合物光纤放大器结构, 如图 6 所示。

激发管为双管结构, 含 Nd 螯合物的掺杂光纤在内部的管中, 从侧面激发。采用这种结构的聚合物光纤放大器可对其使用连续波进行激发, 根据理论计算, 以铽的螯合物掺杂体系为例, 使用 22W 的能量对 22cm 的聚合物光纤进行泵浦, 最大可获得 21dB 的信号增益。

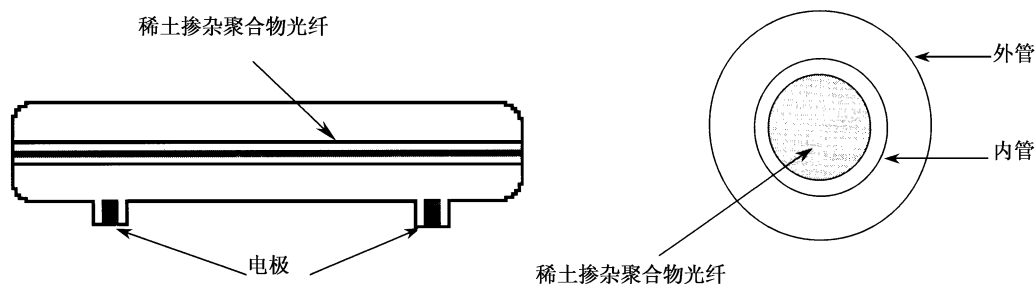


图 6 新的光纤放大器结构

4 展 望

随着聚合物光纤逐步进入实用阶段,开发一系列基于聚合物光纤网络的光器件,如聚合物光纤放大器等,将会越来越重要。高增益有机染料掺杂聚合物光纤放大器的研制成功是迈出的重要一步,但对于有机染料掺杂的聚合物光纤放大器,只有在使用高能脉冲激光器对其进行同轴激发的条件下才能观察到放大现象^[29],这是因为一方面有机染料的三重态不足以使用连续波激光器进行激发;另一方面,若作为固定的器件使用,有机染料的光稳定性仍是一个有待克服的问题,当处于连续波激发的条件下时,染料的光致褪色明显而使增益作用减小甚至失去增益作用。为了寻求更稳定的体系,近年来已逐步将研究重点转到稀土掺杂的聚合物光纤上来。

对于稀土掺杂的聚合物光纤,主要研究的是它的制备方法和光纤的特性,目前尚未获得具有增益作用的光纤放大器。从研究的趋势来看,主要是朝增强光纤的荧光效应方向努力。为减小导致荧光猝灭的无辐射弛豫,采用了氟代和氘代的材料,并取得了明显的效果。但这类材料价格昂贵,因此制备稀土掺杂的聚合物光纤放大器还可以从其他几方面加以考虑:(1)通过选用适当的有机配体,获得可溶于 PMMA 的新的稀土荧光介质;(2)采用新的光纤放大器结构;(3)制备可用于加工成光纤的稀土高分子荧光材料。

尽管到目前为止,基于稀土掺杂的聚合物光纤放大器还处在研究阶段,但随着研究的不断深入,相信不久将会取得重大进展。

参考文献:

- [1] Tagaya A, Teramoto S, Yamamoto T, et al. Journal of Quantum Electronics, 1995, 31(12): 2215.
- [2] Koike Y, Ishigure T, Kobayashi T, et al. Proc SPIE, 1998, 3419: 284.
- [3] Kobayashi T, Sasaki K, Koike Y, et al. Proc SPIE, 1998, 3281: 84.
- [4] Tagaya A, Koike Y, Kinoshita T, et al. Appl Phys Lett, 1993, 63(7): 883.
- [5] Tagaya A, Koike Y, Nihei E, et al. Applied Optics, 1995, 34(6): 988.
- [6] Peng G, Chu P, Xiong Z, et al. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(10): 2215.
- [7] Tagaya A, Teramoto S, Nihei E, et al. Applied Optics, 1997, 36(3): 572.
- [8] Peng G, Xiong Z, Chu P, et al. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(12): 2365.
- [9] Tagaya A, Kobayashi T, Nakatsuka S, et al. Jpn J Appl Phys, 1997, 36: 2705.
- [10] Kuriki K, Kobayashi T, Imai N, et al. Applied Physics Letters, 2000, 77(3): 331.
- [11] Keil N, Strebel B, Yao H, et al. Proc. SPIE, 1993, 1774: 130.
- [12] Chen R, Lee M, Natarajan S, et al. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(11): 1328.

- [13] Chen R, Lee M, Tang S, et al. Proc. SPIE, 1994, 2149: 77.
- [14] Karve G, Bihari B, Chen R, et al. Proc. SPIE, 2000, 3950: 186.
- [15] Gao R, Koppen C, Zheng G, et al. Applied Optics, 1998, 37(30): 7100.
- [16] Twomey C, Chen S. Journal of Polymer Science Part B, 1991, 29: 859.
- [17] Twomey C, Chen S, Blanton T, et al. Journal of Polymer Science Part B, 1993, 31: 647.
- [18] Kobayashi T, Nakatsuka S, Iwafuji T, et al. Applied Physics Letters, 1997, 7(17): 2421.
- [19] Kobayashi T, Kuriiki K, Imai N, et al. Proc SPIE, 1999, 3623: 206.
- [20] Koppen C, Gao R, Yamada S, et al. Proc LEOS, 1997: 254.
- [21] Gao R, Koppen C, Zheng G, et al. Proc SPIE, 1998, 3280: 14.
- [22] Koppen C, Yamada S, Jiang G, et al. Proc LEOS, 1996: 392.
- [23] Kobayashi T, Kuriiki K, Nakatsuka S, et al. Proc SPIE, 2000, 3942: 158.
- [24] Kuriiki K, Kobayashi T, Imai N, et al. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(8): 989.
- [25] Kuriiki K, Nishihara S, Nishizawa Y, et al. Electronics Letters, 2001, 37(7): 415.
- [26] Zhang Q, Ming H, Zhai Y. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 62: 887.
- [27] Zhang Q, Wang P, Sun X, et al. Applied Physics Letters, 1998, 72(4): 407.
- [28] Guo Y, Zheng X, Ming H, et al. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20: 521.
- [29] Kazuhito F. Optics Communications, 1999, 171: 81.

Recent Development of Polymer Optical Fiber Amplifier

LIANG Hao LI Zeng-chang ZHANG Qi-jin

(Department of Polymer Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Polymer optical fiber is a new material for signal transmission. In this paper, the recent progress and research on the polymer optical fiber amplifier have been reviewed, especially the properties of organic dye-doped and rare-earth doped polymer optical fiber amplifier.

Key words: Polymer optical fiber amplifier; Organic dye; Rare-earth; Gain