

有机及高分子 非线性光学材料

合成结构与性能研究

❖ 费逸伟 著 ❖

国防科技大学出版社

有机及高分子非线性光学材料 合成结构与性能研究

费逸伟 著

国防科技大学出版社
·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

有机及高分子非线性光学材料合成结构与性能研究/费逸伟著.
—长沙:国防科技大学出版社,2010.3
ISBN 978-7-81099-732-4

I. 有… II. 费… III. 非线性材料:集成光学材料 IV. TB39
TN204

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 220610 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:唐卫威 责任校对:王 嘉

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:16.25 字数:249 千

2010 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-720 册

ISBN 978-7-81099-732-4

定价:48.00 元

前 言

材料光学现象和任何其他物理现象一样,从根本上来说应当都是非线性的,线性行为只是在一定条件下的近似。线性化使自然科学的规律看起来很优美,然而非线性却给人们带来了充满兴奋的研究内容。有机非线性光学材料与外光场极化强度之间的非线性作用关系研究,诞生了许多开创性的工作成果,所发现的令人神往的非线性光学效应就其广泛性来说确实是很激动人心的。

本专著比较全面地论述了有机及高分子非线性光学材料的合成及分子结构与性能间的相互关系。有机硝基苯类化合物具有独特的给电型和受电型共轭 π 电子体系,呈现优异的二次非线性性能。根据氢键效应对粉末倍频效率的影响作用,获得了性能更为理想的 MNA 衍生物和 P-NA 衍生物,同时改善了化合物的结晶性能。针对氨基酸类衍生物,详细分析了 L-AP 的晶体结构及产生二次谐波的原因,提出了有机-无机盐形成机理,并对手性碳原子消除分子对称中心进行了分析。共轭基干长度较大的 IBF 化合物,因其同样具有给电基团和受电基团而显示较强的双光子吸收非线性效应。

采用类比的方法分析讨论了 MBD 二乙炔衍生物的三次非线性,给出其宏观三阶非线性极化系数 $\chi^{(3)}$ 为:

$$\chi^{(3)} = 2.3(\pm 0.6) \times 10^{-13} \text{ esu}$$

并就其聚合反应特点,结合 PTS 的实验结果推出 MBD 的 $\chi^{(3)}$ 同样也随着转化率的提高而增大。BMD 和 PTS 衍生物的研究工作显示共轭基干长度是影响化合物三次非线性性能的主要因素。不对称取代的二乙炔和乙炔衍生物的合成工作,获得了性能优良的二次非线性高分子材料,由分子结构分析得知,如共轭长度不变,改变取代基使得分子共轭效应加强,则倍频性能提高;如取代基团不变时,延长共轭体系,同样也提高倍频性能。

二阶非线性极化系数 β 与取代基特性常数 σ 及诱导效应指数 I 间的一元和二元回归分析得到经验公式:

单取代苯衍生物

$$\beta = -0.295 + 2.669\sigma$$

双取代苯衍生物

$$\beta = -24.0538 + 7.1417I + 18.1417\sigma$$

采用量子化学的 CNDO/2 方法讨论了有机分子的非线性产生原理,并详细探讨了分子对称因素对非线性极化系数的影响作用。最后,定量计算了 P-NA 和 MNA 的分子偶极矩,得到相应的二次非线性极化系数 β 为:

$$\beta_{\text{P-NA}} = 23.4 \times 10^{-30} \text{ esu}$$

$$\beta_{\text{MNA}} = 40.84 \times 10^{-30} \text{ esu}$$

另外,还对单炔改性的化合物 MSNA 和尿烷改性的二乙炔衍生物 4BCMU 的合成及性能进行了详细研究,二者分别给出了良好的倍频性能和三阶非线性波导效应。

本专著是在著者的博士学位论文的基础上略加修改完成的。有机非线性材料科学作为一门新兴的交叉学科,正在迅速发展之中,所涉及的前沿研究领域很多,所以在本书中难以全面反映其他前沿研究领域的工作,期待着不久的将来,会有更全面而深刻的有机非线性材料科学方面的著作出版。

本专著的出版只是一种尝试,由于著者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请同行读者批评雅正。

费逸伟

2010年3月于徐州空军学院

目 录

前 言

第一章 有机材料非线性光学性能简论

§ 1.1 绪论	(1)
§ 1.2 非线性光学材料频率转换原理	(6)
§ 1.3 有机非线性光学材料研究进展	(13)
参考文献.....	(15)

第二章 二阶非线性极化系数线性回归分析

§ 2.1 问题的提出	(17)
§ 2.2 一元线性回归分析	(21)
§ 2.3 二元线性回归分析	(25)
§ 2.4 经验公式物理意义	(29)
参考文献.....	(32)

第三章 苯衍生物结构与倍频性能研究

§ 3.1 MNA 化合物的合成与倍频性能	(34)
§ 3.2 改性苯衍生物的合成与倍频性能	(41)
§ 3.3 POM 化合物的合成与倍频性能	(51)

第四章 精氨酸磷酸盐二次谐波性能研究

§ 4.1 L-AP 晶体材料合成制备	(55)
§ 4.2 L-AP 晶体结构与非线性光学性能	(58)
§ 4.3 L-AP 及其衍生物二次谐波产生	(65)
参考文献.....	(72)

第五章 复杂共轭结构化合物非线性光学性能研究

§ 5.1 IBF 化合物合成制备	(73)
§ 5.2 IBF 化合物结构与非线性光学性能	(78)
参考文献	(84)

第六章 非线性光学材料晶体结构测试

§ 6.1 问题的提出	(85)
§ 6.2 晶体学数据	(86)

第七章 分子非线性光学性能量子化学计算

§ 7.1 计算量子化学近似方法研究	(105)
§ 7.2 CNDO/2 程序计算结果分析	(111)
§ 7.3 分子非线性光学性能讨论	(121)
参考文献	(136)

第八章 二乙炔高分子衍生物三阶非线性光学性能研究

§ 8.1 二乙炔衍生物 MBD 合成制备	(138)
§ 8.2 MBD 化合物三阶非线性光学性能	(146)
§ 8.3 其他二乙炔衍生物结构与非线性光学性能	(153)
参考文献	(159)

第九章 高分子非线性材料倍频性能研究

§ 9.1 二乙炔衍生物合成与倍频性能	(161)
§ 9.2 乙炔衍生物 NMA 合成与倍频性能	(175)
§ 9.3 噻啉环代单炔 MSNA 合成与倍频性能	(181)
参考文献	(188)

第十章 4BCMU 三阶非线性波导性能研究

§ 10.1 4BCMU 化合物合成制备	(189)
----------------------------	-------

§ 10.2	4BCMU 波导薄膜制备研究	(193)
§ 10.3	4BCMU 三阶非线性波导性能	(203)
第十一章 有机合成实验		
§ 11.1	苯类衍生物制备合成实验	(211)
§ 11.2	复杂共轭化合物合成实验	(214)
§ 11.3	二乙炔类衍生物合成实验	(217)
附录		
一、引言		(233)
二、激光与材料的相互作用原理		(233)
三、实验部分		(241)
参考文献		(247)
结束语		(248)

第一章 有机材料非线性光学性能简论

§ 1.1 绪 论

如果在我们周围所发生的一切物理现象全都是线性的,那么科学研究就会非常单调,生活也会变得极其枯燥无味。幸而,我们生活在一个非线性的世界里,线性化使自然科学的规律看起来很优美,然而非线性却给人们带来了充满兴奋的研究内容^[1,2]。光学现象和任何其他物理现象一样,从根本上来说应当是非线性的,线性行为只是在一定条件下的近似。在以往的线性光学中,介质对外加光场的响应,如以光电场和介质的极化强度来表示,可写成:

$$\overline{P} = \chi^{(1)} \cdot \overline{E}$$

当光电场的强度更高时,上述表示必须代之以:

$$\overline{P} = \chi^{(1)} \cdot \overline{E} + \chi^{(2)} \cdot \overline{E} \cdot \overline{E} + \chi^{(3)} \overline{E} \cdot \overline{E} \cdot \overline{E} + \cdots \quad (1-1)$$

从这个表示式可以看出,以往的线性规律只与其中的一项有关,即场强较低可以忽略非线性项的结果。非线性光学对其研究对象极化强度及场的非线性作用关系规律性的开创性工作诞生了许多令人神往的领域,所发现的浩瀚的非线性光学效应就其广泛性来说确实是很激动人心的。激光器当之无愧是科学史上最伟大的发明之一,它的诞生为许多新的学科的发展奠定了基础。一般地说,非线性光学效应要求使用激光进行研究。自从 Franken 等人 1961 年从实验上观察到了二次谐波现象^[3-5]时起,四十多年的时间里,非线性光学的研究已经经历了几个发展阶段,发现了大量的非线性光学效应。它们不仅大大增长了有关光与物质相互作用的知识,而且也使光学技术产生了革命性的变化,同时也为其他应用学科特别是材料化学学科提供了崭新的探索领域。

每一种非线性效应产生过程都可以由两个部分组成,强光首先在

介质内感应出非线性响应,然后在产生反作用时非线性地改变该光场^[6,7]。从这一观点来看,人们可以提出这样的问题:是否所有的介质基本上都是非线性的?回答是肯定的。原则上讲,光学非线性是构成物质的原子核及其周围电子在磁场的作用下产生非线性运动的结果。在这个意义上,一切物质都存在非线性光学效应。然后这些效应能够显示出来并被人们观察到,取决于许多因素。其中包括内在的,如物质本身结构方面的原因,以及外部条件,如非线性材料晶体生长加工等技术因素。由于各种条件的限制,只有为数不多的材料可以作为实用的非线性光学材料体,这些因素也就是人们在选择非线性光学材料时所要考虑的条件。在一般的非线性光学实践中,人们对材料所提出的要求有如下内容^[8-11]:

- (1)非线性极化率;
- (2)光学透过波数;
- (3)位相匹配性能;
- (4)光学和化学稳定性;
- (5)加工实用形式的可能性。

激光变频是光参量作用过程,它是光波和光学介质之间最终没有发生能量和动量交换的过程,激光倍频、和频、差频、光参量振荡和光参量放大等均属于这一类过程。在光参量作用过程中,由于光波与光学介质之间不发生能量和动量的交换,所以在作用过程中,能量和动量是守恒的,而能量交换只表现在参与非线性相互作用的各个光波之间,因而要求各个参与相互作用的光波应满足相位匹配条件,这样也就要求光学介质对光波不产生共振吸收的作用。目前,非线性光学效应的研究领域主要包括以下几个方面。

1. 相位匹配

用作激光倍频的材料,除必须具有比较大的非线性光学系数外,还必须能够实现相位匹配。在倍频过程中,基频光一旦射入非线性光学材料,在光路上的每一位置都将产生二次极化波,这些极化波都发射出与之相同频率的二次谐波。这些二次谐波在材料中的传播速度与入射基频光波在材料中的传播速度相同,因为光频电场在材料中传播到哪里,就会在哪里产生二次极化波,但受材料折射率色散的影响,由二次

极化波发射的二次谐波的传播速度与入射基频光波的传播速度就不相同了。在正常色散范围内,频率增高,折射率变大,故材料中的二次谐波总是跟不上二次极化波的传播。二次谐波相互干涉的结果,决定了在实验中观察到的二次谐波的强度,这个强度与二次谐波的相位差有关,相位差为零时即相位匹配,则二次谐波便得到不断加强。如果相位差不一致,则二次谐波相互抵消。当相位差为 180° 时,不会有任何二次谐波的输出。因此,要想得到较强的二次谐波输出,就要求不同时刻在材料中不同部位所发射出的二次谐波的相位一致。因为有了相位匹配技术的应用,可使材料的非线性光学效应大幅度提高,从而为非线性光学材料的应用奠定了理论基础。

2. 光波混频

光波混频包括和频和差频两种效应。当角频率分别为 ω_1 和 ω_2 的两束光波在非线性光学介质内发生耦合作用时,将产生角频率 $\omega_3 = \omega_1 \pm \omega_2$ 的极化波,并辐射出相应频率的第三种光波,这一过程称为三波混频。光波混频和倍频一样,也是二阶非线性光学效应,当 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ 时,将产生和频,又称频率上转换。通过和频可以将不可见的红外光转换为可见光,甚至紫外光。当 $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ 时,将产生差频,又称频率下转换,通过差频可望获得远红外以至亚毫米波段的激光。混频过程的有效转换,必须要满足光量子系统的能量守恒和动量守恒关系,而且只有满足相位匹配条件,才能使频率上转换有效地得到最大的输出功率。混频效应的应用虽然不如倍频效应那样广泛,但它仍不失为获得新的光波段的重要手段。

3. 光参量振荡

当一束频率为 ω_p 的强激光射入非线性光学材料时,若在材料中再加入频率远低于 ω_p 的弱信号光(频率为 ω_s),由于差频效应,材料中将产生频率为 $\omega_p - \omega_s = \omega_i$ (称为空载频率)的极化波,而辐射出频率为 ω_i 的光波,当此光波在材料中传播时,又与泵浦光混频,便产生频率为 $\omega_p - \omega_i = \omega_s$ 的极化波,进而辐射出频率为 ω_s 的光波。若原来频率为 ω_s 的信号波与新产生的频率为 ω_s 的光波之间满足相位匹配条件,则

原来的 ω , 信号光波在损耗泵浦光波功率的作用下得到了放大, 这就是光参量放大原理。这一光参量放大过程, 需要满足频率关系:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i$$

另外, 为了达到最大的能量转换, 三种光波还应满足相位匹配条件, 即:

$$k_p = k_s + k_i \text{ (波矢)}$$

或:

$$n_p \omega_p = n_s \omega_s + n_i \omega_i$$

式中 n_p 、 n_s 和 n_i 分别表示材料在用下标标明的相应频率时的折射率。

在光参量放大过程中, 能量的转换效率是很低的。为了获得较强的信号光, 可把非线性光学材料置于光学谐振腔内, 以使频率为 ω_s 和 ω_i 的极化波不断地从泵浦的光吸收能量, 从而产生增益。当增益一旦超过腔体损耗时, 便发生振荡。

4. 电光效应

材料在受到光入射的同时, 若再受到外加电场的作用, 所引起的材料折射率的变化现象称为电光效应。从材料的线性电光效应的发光机制来看, 材料的电光效应也归属于非线性光学研究的范畴, 其二阶非线性电极化强度 $P_i^{(2)}$ 可表示为:

$$P_i^{(2)} = \chi_{ijk}^{(2)} (\omega' = \omega + \Omega) E_j(\omega) E_k(\omega)$$

式中, ω 为光频电场的频率, Ω 为外加电场的频率 ($\Omega \ll \omega$), $\chi_{ijk}^{(2)}$ 为二阶电极化系数, 为一个三阶张量。

材料的电光效应, 通常采用 Pockels 方法来描述, 即将材料的光学性质用介电隔离率张量 $[\beta_{ij}]$ 来表示。在介电主轴坐标系中, $\epsilon_{ij} = \beta_{ij}^{-1} = n_{ij}^2$ 。如果把未加外电场的材料的介电隔离率张量表示为 β_{ij}^0 , 施加外加电场后的用 β_{ij} 表示, 则介电隔离率张量的改变量可表示为

$$\Delta\beta_{ij} = \beta_{ij} - \beta_{ij}^0$$

材料的电光效应可表示为:

$$\Delta\beta_{ij} = \Delta\left(\frac{1}{\epsilon_{ij}}\right) = \Delta\left(\frac{1}{n_{ij}^2}\right) = \gamma_{ijk} E_k(\Omega) + h_{ijkl} E_k E_l + \Lambda \quad (1-2)$$

式中, γ_{ijk} 为材料的线性电光系数, 或称为 Pockels 系数, 单位为 m/V 或

cm/V ; h_{ijk} 为材料的二次电光系数, 或称 Kerr 系数, 单位为 $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-2}$ 。介质隔离率张量的变量 (β_{ij}) 与外加电场一次项 E_k 成正比的变化现象, 称为线性电光效应, 或称 Pockels 效应; 与外加电场的二次项 $E_2 (E_k E_l)$ 成正比的变化现象, 称为二次电光效应, 或称为 Kerr 效应。

5. 光折变效应

光折变材料是指光致折射率变化的材料, 是一种非局域效应, 可以在 mW 级的激光作用下表现出来。光折变材料可用于全息存储、光学图像处理、光学相位共轭等许多方面, 目前已形成了非线性光学研究领域中的一个重要的新分支, 即光折变非线性光学。

光折变效应可归结为以下三个过程:

(1) 光频电场作用于光折变材料时, 光波激化电荷并使之转移和分离;

(2) 电荷在材料内的转移和分离, 引起了电荷分布的改变, 建立起空间电荷场, 强度约为 105V/m ;

(3) 空间电荷场通过有关材料线性电光效应, 致使材料的折射率发生变化。

近年来, 人们对光折变效应研究的兴趣迅速增强的原因是: 比较简单的设备, 在室温下用低功率激光已实现多种光学变换, 诸如利用光折变时间微分效应, 进行图像追踪, 作为一种光信息处理器件; 简并四波混频加上非相干光调制, 实现把非相干图像转换成相干图像, 高效率自泵浦相位共轭镜, 可实现图像畸变复原; 全光学全息关联存储, 将使未来的计算机具有仿真大脑的功能, 实现图像识别、语言学知识处理、高增益光放大器等。

为了适应现代技术发展的需要, 除了探寻新的非线性光学效应外, 一个很重要的工作就是寻找新的非线性光学材料, 具有更大的非线性极化率和更高次的非线性效应, 同时考虑其光学稳定性, 以抵抗更强的光场可能带来的损伤。以往大量研究并开始应用的非线性光学材料基本上是介电晶体, 都属于无机材料。无机非线性晶体大部分易于潮解、脱水, 其机械性能和热稳定性能不太理想, 激光作用时易引起损伤, 造成晶体折射率不均匀及在晶体表面或内部留下伤斑。对于二次倍频非线性光学过程, 晶体如出现折射率不均匀, 将使转换效率下降而不能继

续使用。例如 LiNbO_3 晶体较易出现这一现象,使它的应用范围受到限制。所以,通常无机非线性晶体在使用过程中都放置在一个密闭的容器中,以延长材料的使用寿命,因此给实验装置的设计和应用带来诸多不便^[12,13]。

近年来,发现一部分分子结构为 π 电子共轭体系的有机材料及其相应的高分子材料所表现出的光学非线性效应要比无机介质大,其二阶电极化率比常用的无机倍频材料高出许多倍^[14-16],如 2-甲基-4-硝基苯胺(MNA),它的二次非线性性能指数(密勒指数)是磷酸二氢钾(KDP)的 50 倍(见图 1-1)。聚合物材料也有类似的重要性质,目前研究较多的是二乙炔类衍生物高分子材料,其最大宏观非线性极化 $\chi^{(3)}$ 数值约为 10^{-9} esu,属于亚微微秒级的非线性响应。其合成的程序是按照分子设计的方法,在二乙炔分子上引入具有非线性活性的有机基团,整个化合物单体的分子链上形成共轭长度更长的 π 电子离域体系,赋予了二乙炔衍生物良好的高次光学非线性效应^[17-19]。

最近几年发展起来的有机及高分子非线性光学材料,其机械性能、热稳定性及激光破坏阈值有可能要高于无机非线性材料,特别是由于具有很高的二阶电极化率,使得它们潜在的应用前景很大,因此受到国内外材料科学界广泛的关注,并在有机及高分子材料的非线性光学理论、材料的分子设计与合成及晶体生长技术等方面已开展了研究工作,有了不小的进展。由于研究工作在我国起步较晚,有机及高分子材料的合成与非线性性能测试脱节,因此不少工作尚停留在定性测试及理论研究阶段,有待于今后的深入发展和提高^[20,21]。

§ 1.2 非线性光学材料频率转换原理

频率转换技术能扩大现有激光器的用途。在这些技术中,二次谐波产生(SHG,也称倍频)曾经得到较充分的发展,如在激光致盲、远程测距、水下传输等技术应用中,要求大功率的绿色激光光源。这是因为人眼对绿光最敏感,用绿色强光作为武器易使敌方军事人员致盲;由于对绿光有着灵敏度极高的光电探测器件,用绿色激光来测距有利于提高测程;在江河湖海等水下测距或探测目标时,利用绿光做光源有利于

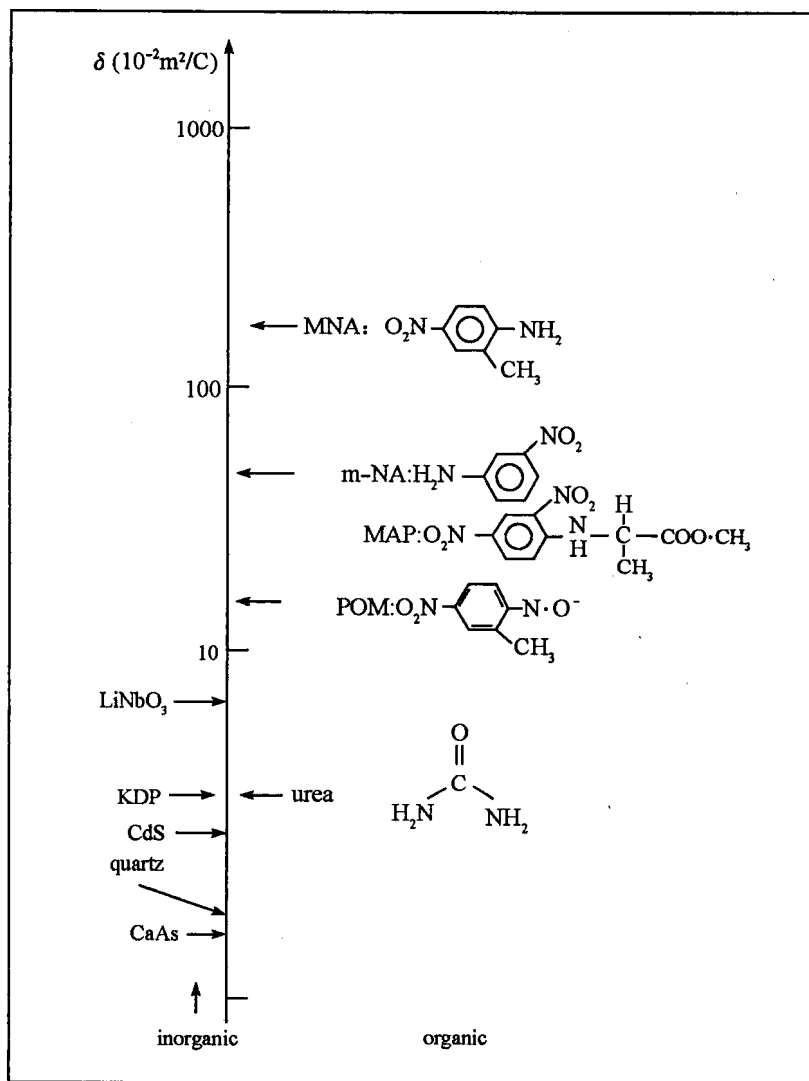


图 1-1 有机、无机体非线性光学性能比较

减少光在水中传输时的损失。由于目前缺乏直接激射绿光的高功率器件,所以在这些应用中常采用性能优良的高功率 YAG 器件,通过倍频

($\lambda = 1.06\mu\text{m} \rightarrow 5300\text{\AA}$) 获得高功率的绿光^[22]。

二次谐波产生技术若与其他频率转换过程相结合,能提供由单个固定频率的激光器获得许多输出频率的手段。例如由工作波长为 $1.064\mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器可与若干的染料激光器、光学参量振荡器及受激喇曼散射系统结合,改变 Nd:YAG 的输出频率。但若要求获得令人满意的倍频效果,则要求采用性能优良的频率转换晶体。图 1-2 给出了相关频率转换图示。

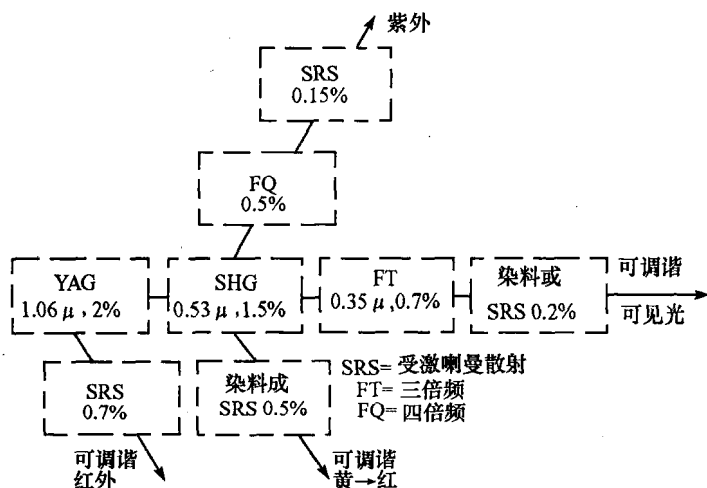


图 1-2 以 Nd:YAG 激光器为基础的频率转换图示,借助于各种技术不同的结合,可以覆盖紫外至红外光谱区域

我们已经知道介质在强场作用下, P 与 E 的关系为:

$$P = x^{(1)} \cdot E + x^{(2)} \cdot E \cdot E + x^{(3)} \cdot E \cdot E \cdot E + \cdots \quad (1-3)$$

若忽略式(1-3)中三次以上各项,则 $P = x^{(1)} \cdot E + x^{(2)} \cdot E \cdot E$ 。现在我们来分析光电场通过非线性介质时的情况,设场振幅 $E(Z, t)$ 为:

$$E(Z, t) = E \cdot \cos(\omega t - KZ) \quad (1-4)$$

式中, E 为光源场振幅, $K = 2\pi n\lambda$, λ 为波长, n 为折射率,称 K 为波矢量,式(1-4)代入式(1-3)得

$$P = x^{(1)} \cdot E + x^{(2)} \cdot E \cdot E$$

$$\begin{aligned}
 &= x^{(1)} E_0 \cos(\omega t - KZ) + \frac{1}{2} x^{(2)} E_0^2 \cos(2\omega t - 2KZ) + \frac{1}{2} x^{(2)} E_0^2 \\
 &= P^{(1)} + P^{(2\omega)} + P^{(0)}
 \end{aligned} \quad (1-5)$$

显然入射光波频率若视为 ω , 则如果介质产生二次非线性极化效应, 极化波中将包含有基波 $P^{(\omega)}$ 、倍频波 $P^{(2\omega)}$ 和直流分量 $P^{(0)}$ 。此外, 进一步讨论得知, 由于介质中的电子发生位移(在光电场作用下), 其相应的位能可表示为:

$$U(x) = \frac{1}{2} m\omega_0^2 x^2 + \frac{1}{3} mDx^3 \cdots \quad (1-6)$$

作用到电子上的恢复力是:

$$F = -\frac{\partial U(x)}{\partial x} = -(m\omega_0^2 x + mDx^2 + \cdots) \quad (1-7)$$

式中, m 为电子质量, ω_0 和 D 均为比例常数。

对于有对称中心的晶体介质, 因为 $U(X) = -U(X)$, 所以, $U(X)$ 只含有 X 的偶次项, 而作用到电子上的恢复力无偶次项。对于有对称中心的晶体, 其极化强度 P 的偶次项为零, 或者说 $x^{(2)}, x^{(4)} \cdots$ 等偶次项的宏观电极化率的偶次项为零, 也即二次谐波产生等偶次项的非线性效应为零。

二阶非线性光学效应: 当激光通过非线性光学材料时, 所产生的二次阶非线性光学效应, 是将频率为 ω 的入射光变换成频率为 2ω 的出射倍频光, 这就称为二次谐波发生(SHG)。利用材料倍频效应可拓宽激光波段, 这样可使激光得到更有效的应用, 例如将 Nd:YAG 激光器输出的波长为 $1.06\mu\text{m}$ 激光通过倍频材料后, 所产生的波长为 $0.532\mu\text{m}$ 的倍频光, 可用于眼科医疗、水下摄影和激光测距等方面。用于二次谐波发生的激光器应具备如下特性:

- (1) 能够输出很高的峰值功率。二次谐波功率正比于基频功率的平方, 利用比较高的激光峰值功率, 便可获得更高的二次谐波效应。
- (2) 激光谱线宽度要窄, 光束发散角要小。这样的基频光束能够保证很好地满足材料相位匹配, 有利于提高二次谐波的能量转换效率。
- (3) 输出的是单纵模和单横模激光。单模激光束的时间和空间结构都趋于平滑, 这样便可减少因激光束的时间和空间起伏所引起的材料损伤的可能性。

三阶非线性光学效应: 当频率为 ω 的激光入射非线性光学材料