

准相位匹配技术

刁述妍



常用激光器输出波长通常为近红外单一频率的激光，随着科技的发展，各行各业对激光器的需求大大增加，对激光器输出波长提出了更高要求，不但要求输出波长向红外和紫外扩展，而且输出波长要连续可调谐。通过非线性频率变换可以获得普通激光器达不到的输出激光波长，如紫外、中红外和远红外激光等，并且输出激光波长可以在一定范围内变化（即可调谐），如1~3微米、3~5微米和8~13微米等，这三个重要波段的红外相干光源在光谱研究、激光制导、激光定向红外干扰、大气监测等领域有广泛应用。

光在介质中的传播过程就是光与物质相互作用的过程，如果介质对光的响应呈非线性关系，光学现象属于非线性光学，此时光在介质中传播会产生新的频率，这个过程称为非线性频率变换，入射光为泵浦光，产生的新频率的光称为参量光。在利用介质进行频率变换时，由于不同介质材料的折射率不同，同一材料对不同波长光的折射率不同，使光波在介质中的传播速度是频率（波长）的函数。泵浦光与参量光频率不同，它们的相速度不同、相位也不同，只有在满足一定相位关系时才能获得高效的非线性频率转换，这称为相位匹配。如三波混频过程中，波长为 λ_3 （角频率为 ω_3 ）的入射光经过介质产生波长为 λ_1 （角频率为 ω_1 ）和波长为 λ_2 （角频率为 ω_2 ）的参量光，介质对三波的折射率分别为 n_3 、 n_1 和 n_2 ，三波之间满足能量守恒关系 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$ ，而它们的相位关系为 $\Delta k = 2\pi (n_3/\lambda_3 - n_1/\lambda_1 - n_2/\lambda_2)$ ， Δk 一般不为0，称作相位失配，是影响参量增益与转换效率的重要物理量。为获得强的非线性频率变换过程，通常希望相位失配 $\Delta k = 0$ ，此条件称为相位匹配条件。实现相位匹配的方法通常有两种：双折射相位匹配（BPM）和准相位匹配（QPM）。

传统的双折射相位匹配技术利用单轴或双轴晶体的双折射效应和色散特性，通过选择光波的波矢方向和偏振方向实现相位匹配。实现双折射相位匹配有角度相位匹配和温度相位匹配两种方法。角度相位匹配是通过改变入射光至晶体的角度从而达到相位匹配的目的；温度相位匹配是利用折射率对温

度敏感的晶体，通过改变晶体温度的方法使折射率发生变化，从而达到相位匹配的目的。但双折射

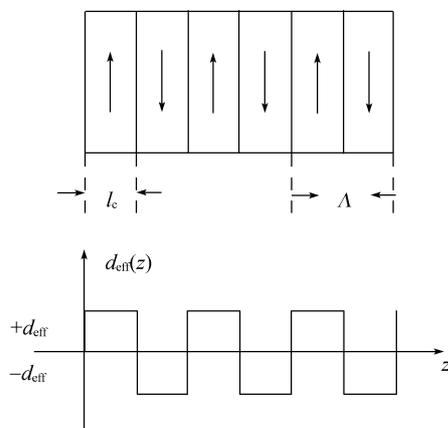
相位匹配的缺点主要有：① 材料本身的限制。晶体的种类很多，并不是所有晶体都能实现双折射相位匹配，只有某些具有特殊结构的晶体才能实现双折射相位匹配。双折射晶体还需沿特殊方向切割，或特定的工作温度，使用受到极大限制。如KTP晶体有着非常大的非线性系数，良好的物理、化学和光学性质，是一种常用的非线性晶体，但在正常状态下不能实现990nm以下波长的倍频。② 由于混频光波的相互作用方向不一致，限制了相互作用长度，降低了转换效率。③ 不能应用晶体的最大非线性系数。KTP的最大非线性系数 $d_{33} = 16.0 \text{ pm/V}$ ，KTP在1064nm激光倍频中只能使用 $d_{24} = 3.64 \text{ pm/V}$ 和 $d_{15} = 1.91 \text{ pm/V}$ ，若在倍频时能使用 d_{33} ，理论上倍频效率可以提高10倍之多。常用于双折射相位匹配的晶体为KTP、BBO、LBO、CLBO等。KTP晶体的有效非线性系数比其他晶体大，在中小功率下被广泛使用，LBO晶体具有高的损伤阈值，可以实现非临界相位匹配，多用于高功率情况。

准相位匹配技术拓宽了非线性晶体的应用范围，极大提高了相互作用光波的频率转换效率，已成为非线性光学材料和固体激光器领域的研究热点。

一、准相位匹配的基本原理

准相位匹配技术是通过某种方法使在晶体中传播的光波波矢相位经过一个相干长度后改变 π ，即相位反转，使相位反转的方法就是周期性改变晶体非线性系数的符号。这个思想最早在1962年由Armstrong等人提出：利用非线性极化率的周期跃变可以增强非线性光学频率转换效率，这就是准相位匹配的雏形。实现准相位匹配的方法很多，其中最重要和应用最广的是利用周期或非周期地改变二阶非线性系数的方法，称为周期极化准相位匹配，这样的晶体称为周期极化晶体。由于当时加工工艺的限制，无法制

造出实现准相位匹配的周期极化晶体，致使在相当长的一段时间内，准相位匹配技术仅仅停留在理论阶段，没有得到实际应用。最早发现准相位匹配非线性过程增强是将薄的非线性晶体的晶片叠在一起，交替地把晶片旋转 180° ，即铁电畴晶片堆积方法。20世纪90年代以后，随着周期极化晶体制作工艺的发展，外加电场极化方法逐渐成熟。1993年，日本Sony公司的M. Yamada首次报道了他们于1992年利用外加电场极化法使铌酸锂晶体的周期产生极化反转，制成周期极化的铌酸锂晶体。图为周期极化晶体结构及准相位匹配原理示意图（ d_{eff} 为有效非线性系数、 l_c 为相干长度、 Λ 为晶体周期），箭头方向为铁电畴的自发极化方向。相邻两片铁电畴的自发极化矢量方向相反，因而与奇数阶张量相联系铁电畴的物理性质，如非线性光学系数、电光系数、压电系数等都是同值而反号，因此此类晶体的物理性质不再是常数而是空间坐标的周期函数。



准相位匹配技术通过将晶体设计成周期结构，来满足相位匹配条件。铁电材料是目前实现准相位匹配的最理想材料。所有的铁电晶体在居里温度以下都会表现出自发极化特性，并且能在外加电场的作用下，有效地实现铁电畴反转，改变晶体的自发极化方向。到目前为止，已有相当多的晶体用于制作QPM元件，如PPLN、PPKTP、PPLT和PPRTA晶体等。例如，利用铁电晶体 LiNbO_3 的非线性系数 d_{31} 能够实现双折射角度相位匹配，然而其最大的非线性系数 d_{33} 却不能实现相位匹配，但可以通过准相位匹配对 LiNbO_3 的 d_{33} 加以利用。把 LiNbO_3 制成周期性反转的铁电畴结构，即周期性改变非线性系数符号，使参量光强在本该衰减的区域沿通光方向继续加

强，从而获得高效率的非线性频率转换。

从能量观点来看，参量产生过程的非线性频率转换中，泵浦光波的能量是通过介质的非线性极化不断耦合到参量光波中的，一个相干长度内相互作用光波的相位符号相同，频率变换不断得到加强，但在另一个相干长度内相互作用光波的相位符号相反，能量通过非线性极化由参量光波返回泵浦光波。而准相位匹配技术则相当于对各部分产生的参量光波做了一个调制，能够使参量光波在一些本该减弱的区域得以继续加强，因此只需周期性改变非线性系数的符号，实现相位周期性的反转，从而使晶体不同位置产生的参量光波的相位一致，泵浦光波的能量不断耦合到参量光波中。

二、准相位匹配技术的优势

首先，准相位匹配技术扩大了已有非线性光学材料的使用范围。没有双折射效应或双折射效应很小的晶体也可以实现准相位匹配，理论上能够利用晶体的整个透光范围。例如PPLT晶体因为双折射效应很小不能实现传统的双折射相位匹配，经过周期极化以后可以实现准相位匹配。其次，准相位匹配技术可以利用最大的非线性系数 d_{33} 。第三，准相位匹配技术不存在走离效应。由于没有双折射效应的限制，混频光波的偏振方向可以任意选择，通常选择相同的偏振方向。这样，相互作用光波沿相同方向相互作用，可以利用整个晶体的长度，较大提高了转换效率。第四，准相位匹配技术可以人为设计晶体的极化周期。根据实际需要，设计合理的极化周期，并且可以设计多周期、非周期极化晶体和各种形状的极化晶体，配合温度调谐可以获得连续的、宽波段的参量光输出。

三、准相位匹配技术的应用

高清晰度激光显示 现代工业、军事、医疗和科研等领域对绿、蓝、紫等短波长激光光源需求越来越大，而这个波段的固体激光光源相对较为缺乏，通过准相位匹配技术对近红外光源的倍频、三倍频可以达到这个目的。激光显示是实现超大屏幕、高清晰度显示最有前途的技术之一，它比其他显示技术具有超大屏幕、高亮度、高饱和度、高分辨率等优越性，全固态激光器再加上准相位匹配非线性频率变换（和频、差频、参量产生等），实现红、绿、兰三基色激光输出，可用于大屏幕激光投影显示。

差分吸收雷达 差分吸收雷达用以测量大气中的臭氧、二氧化硫、苯、甲烷、硫化氢、氯化氢、氟化氢、丙烷等气体，精确确定大气中水蒸气的浓度。差分吸收雷达系统中雷达发射源是其重要组成部分，采用准相位匹配技术的光参量振荡器输出可调谐红外光，其光谱和能量能满足差分吸收雷达的要求，可作为雷达发射源。

中红外激光定向干扰仪 目前，新一代红外制导导弹大多采用了中波和长波红外探测器，如 $3\sim 5\mu\text{m}$ 红外导弹在国际上被看作具有广泛发展前景的新一代攻击武器，因此 $3\sim 5\mu\text{m}$ 红外导弹的抗干扰技术（如红外定向干扰仪）也同步迅速发展起来。中红外激光定向干扰仪由导弹报警系统、激光干扰源（可调谐）、发射塔组成。采用准相位匹配技术输出可调谐中红外参量光的光参量振荡器，作为激光干扰源能有效致盲最新一代红外导弹，以其体积小、重量轻、亮度高、寿命长、效率高、技术相对成熟而成为红外定向干扰仪的重要组成部分。

波长变换器 波长变换器是光波波长路由系统和解决通信信道竞争的核心器件，通过波长变换可以实现异种网络的互连，也可以实现通信网络内部波长

路由和复用，有效解决网络内部通信容量的限制和交通拥挤，可以便捷灵活地管理网络。准相位匹配 PPLN 波导可以作为高效波导器件把可见光转换为中红外光，也可用于制作紫外或中红外光源，可广泛用于生物医学 DNA 分子检测、高画质 DVD 紫外光和蓝光光源以及其他需要高效灵活波长变换的产品。

高速全光开关 高速全光开关是光通信系统中的关键器件，它可用于备份光源的光路切换，以及用于逻辑、数字系统中的光路选择和光交换等。基于准相位匹配 PPLN 波导非线性效应的全光开关具有透明特性、速度快、噪声低、所需控制光功率小，并保持相互作用光波的强度和相位信息等优点，在将来的全光网络中具有重要的应用前景。

准相位匹配技术具有独特的优越性，在非线性光学频率变换、光脉冲整形、全光开关、全光波长变换、电光调制、声光调制等方面应用广泛。随着非线性晶体制备技术的提高，随着人们对准相位匹配技术理论更深入的认识、理解和探索，准相位匹配器件从小型化到集成化的发展是必然的。

（山东省临沂师范学院物理系 276005）

科苑快讯

用仪器检验牛肉的鲜美度

日本研究者开发了一种仪器，能客观评估肉的鲜美度，这对一个特别关心牛肉质量的国家非常重要。

日本和牛（Wagyu）肉以其大理石状的脂肪著称，这些脂肪使牛肉味道特别鲜嫩。不过宫崎大学（University of Miyazaki）的动物饲养专家入江成一（Masakazu Irie 音译）说，大理石状脂肪并非肉质鲜嫩的唯一原因；如果这些脂肪较硬，而且熔点很高，感觉就会像嚼蜡烛。并非所有较软的脂肪都有益，亚油酸中的脂肪含量高，但是并不受青睐。

入江和同事拿出一个手提轻便设备检测牛肉中的油酸浓度。他们说，不饱和脂肪浓度是肉质鲜美度的指标。光纤引导近红外光照射牛肉，脂肪将光反射回来，这些光线的类型与脂肪类型和其不饱和脂肪浓度有关。这一过程在几秒内即可完成，不会对牛肉造成任何破坏。

不过，美国宾夕法尼亚州费城莫奈尔化学感官

中心（Monell Chemical Senses Center）以前的研究者克里斯滕森（Carol Christensen）说：入江的设备并不能替代舌头，如果食品生产商想以仪器度量值替代人类的品尝，那将是很荒谬的。

入江计划将此设备用于日本福山（Fukuyama）国立家畜饲养中心（National Livestock Breeding Center）由川村正（Tadashi Kawamura 音译）领导的另一个项目，川村正在试着建立一个基于化学特征的牛肉分级系统。他们找到 10 位经过专门训练的牛肉品尝者，这些人将通过感官判断牛肉的特征。比如，这些数据将与牛肉中 20 种成分浓度的化学数据相对照，包括油酸和次黄甙酸，这些物质提升了食品的鲜美度，和味精的作用差不多。

川村希望超市和餐馆以后能提供一个标准（可能是 1~5 级），来衡量肉的水分、脂肪含量等质量特征。

（高凌云编译自 2008 年第 2 期《欧洲核子研究中心快报》）