

全固态激光及 非线性光学频率变换技术

中国科学院院士 姚建铨

(天津大学激光与光电子研究所, 教育部光电信息技术科学
重点实验室, 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

TN24 A

摘要:在众多的激光器件中,由半导体激光器泵浦的固体激光器(LDPSSL,简称全固态激光器)由于其转换效率高、光束质量好、工作稳定可靠、体积小、重量轻、寿命长、工作介质覆盖的波段广及运转方式多样,再加上与非线性光学频率变换技术相结合,可实现多种波长的运转,致使这类激光器具有逐步取代气体、液体及传统固体激光器的可能性,因此这类器件已经成为当前激光技术发展的主要方向。本文综述了全固态激光及非线性光学频率变换技术的发展及在激光与光电子领域中的地位与作用,概述了它们的基本原理、特点及关键技术,展示了其广阔的应用前景。

关键词:激光二极管 全固态激光器 可调谐固体激光器 非线性光学频率变换技术 光学参量振荡器 准相位匹配 周期极化晶体

All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology

Member of The CAS YAO Jianquan

(Institute of Lasers and Opto-electronics, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: Among different kinds lasers, laser diode pumped solid state lasers (all solid state lasers or LDPSSL, DPL) have become main direction of laser technology now which have a lot of advanced such as high conversion efficiency, good beam quality, good stability, long life and wide operated wavelength of laser media. DPL combines with nonlinear optical frequency conversion technology will extend more wide wavelength region. The developments of all solid state laser technology, nonlinear optical frequency conversion and quasi-phase matching technology, as well as their important status in the laser and opto-electronic fields are summarized in this paper. The basic principle, characteristics, critical technologies and their extensively useful perspective are also described.

Key words: laser diode, all solid state laser, tunable solid state laser, nonlinear optical frequency conversion technology, optical parametric oscillator, quasi-phase matching, periodically poled crystal

1 全固态激光技术

1.1 高功率激光二极管

激光二极管是以半导体材料为工作物质,用电注入直接泵浦的方式激励的一种小型化激光器。它诞生于1962年,经过近40年的研究,激光二极管得到了迅速的发展:波长的覆盖范围从红外至蓝绿光,输出功率的水平从通信用的10mW量级至10W量级,器件结构经历了从同质结——异质结——量子阱结构的发展阶段,激光器寿命从几小时至100万小时等,特别是量子阱结构材料生长技术以及能带工程的有效运用,为小型化、大功率半导体激光器的发展带来了生机,组合列阵甚至达到10kW之上。半导体大功率激光器的最大成就是代替传统的脉冲氙灯或氪灯作为固体激光器的泵浦光源,从而把半导体激光器的高效率、长寿命、高重复频率、小型化以及波长的可调特性等特点与固体激光器的高光束质量、线宽窄、光谱纯及发散角小统一在一起,从而带动了半导体激光器在光电子技术、光通信、光存储、光信息处理、医疗以及军工等应用领域,开拓了迅速发展的广阔天地。

1.2 蓝、绿半导体激光器(LD)

在蓝、绿光方面,半导体发光管及激光器,应用十分广泛:极高密度磁光存储器、彩色显示器、数字成像、高清晰度激光打印机、全息照相存储器、极大容量通信系统、光学计算机及专用医疗及军事系统等。1991年美国的3M公司用ZnSe材料在77K温度下获得蓝光脉冲振荡,1993年日本松下公司在室温下获得ZnSe/ZnCdSe(II-IV)应变量子阱技术530nm绿色脉冲激光输出。1996年日本的Nichia公司首先实现了GaN蓝光LD室温条件下的连续运转,1999年实现在室温下2mW连续工作,寿命达到10000小时。HP公司研制成功GaInN/AlGaIn多量子阱蓝光LD,其脉冲功率达到80mW。SDL公司在1998年初宣布研制成功GaInN蓝光LD,达到每面脉冲功率为150mW。1996年Sony与Nichia公司获得515nm绿光及408.6nm蓝光LD,1997年运用侧向外延技术在室温下将其寿命由35h延长到1000h,1998年又研制出20~30mW的蓝光LD。可擦写光盘的蓝紫光LD半导体GaInN蓝光激光器的问世,对光盘存储容量的扩充将是又一次新机遇,

有可能使单片存储量再扩大4~5倍,达20G位元。不容忽略第四代DVD产业的关键是GaInN蓝光激光器,尽管难度较大,实用化还要过若干年,但发展趋势是肯定的。

1.3 垂直腔面发射激光二极管

近年来,由于人们对于超长距离、超高速千兆比特/秒(Gbit/s)至兆兆比特/秒(Tbit/s)光纤网络的需求,对于高性能、低成本光互联网的需求以及对于光学存储密度的不断提高的要求,使一种性能优异的半导体激光器——垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)应运而生。1979年日本东京工业大学率先提出了垂直腔面发射激光器思想,并于1988年研制出首枚VCSEL,其阈值电流低于1mA,特征为圆形输出射束,易与光纤耦合,转换效率高,调制速率快,阈值低,噪声小;垂直腔面很小,易于高密度大,规模集成和成管前整片检测。VCSEL还非常适合在光互连、激光打印、气体检测、高密度光存储及显示方面的应用。VCSEL采用三明治式结构,通过活性层在垂直方向构筑激光谐振腔,相干性极高的激光束从顶部射出(如图1)。传统二极管激光器都是光束从芯片边缘发射的水平腔激光器,往往称它们为边缘发射激光器(EEL),如图2所示,边缘发射激光器要等切割成小芯片之后和准备封装时才检验,因此它在大量生产和低成本方面始终存在较多问题。

据美国最近预测,仅就用于全球消费的VCSEL激光收发机而言,2003年VCSEL将达到12亿美元,2008年将达到近60亿美元。

1.4 全固态激光技术

自1960年激光器诞生以来,各类激光器及激光技术发展极为迅速,其中固体激光器的发展尤为突出,在不同领域有着广泛的应用,它在材料加工、军事、医学及科学研究等方面显示出巨大的潜力。诸多应用领域对更高功率的激光器的需求导致了更大规模的激光系统的设计和制造。但是传统固体激光器的电光转换效率较低,约为1~5%左右,并受热效应的影响,大大限制了它的使用,对于高功率器件更受限制。

科学家们针对传统固体激光器的不足,摒弃传统的闪光灯泵浦方式,采用与固体激光介质(如几种稀土离子)的吸收峰匹配的激光二极管泵浦方式(学

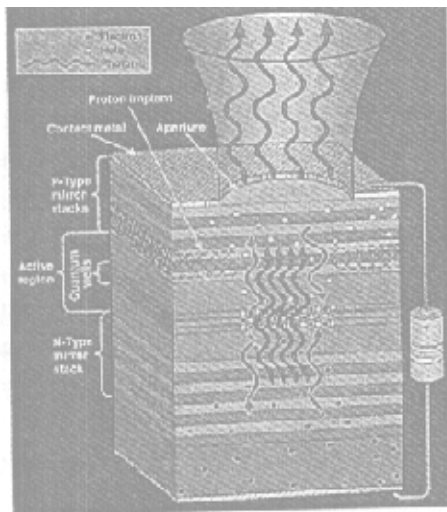


图 1

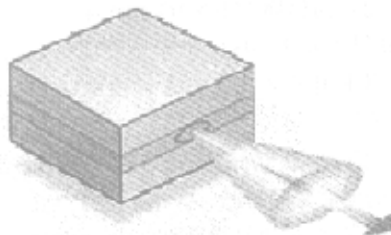


图 2

术上称“激光二极管泵浦的固体激光器”，简称“全固态激光器”，英文为 LDP—SSL，简称 DPSSL，DPL），可使固体激光器的效率大大提高，从而达到减少热效应，改善光束质量及提高稳定性的目的，同时这类激光器体积小、重量轻，这可以说是固体激光技术的一场“革命”，由于固体激光工作介质覆盖的波段广，运转方式多样，再加上可配合各种频率变换技术，致使这类激光器具有逐步取代气体、液体及传统固体激光器的可能性，图 3 所示为激光二极管泵浦的固体激光器的装置图。

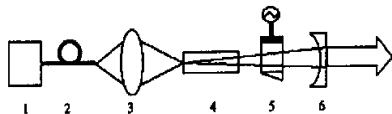


图 3 LD 泵浦的固体激光器装置图

1. 激光二极管；2. 光纤；3. 耦合透镜；4. Nd:YAG；5. 声光调 Q 开关；6. 输出镜

DPSSL 是我国很有条件发展的高技术产业，我

国在固体激光介质和非线性光学晶体的研发水平位居国际前沿，有的处于国际领先（如 BBO、LBO 等），并已进入国际市场，有很强的持续创新发展能力。作为理想泵浦源的半导体大功率激光器也有了相当规模的产业化系列开发实力，对我国 DPSSL 产业的发展无疑是一个绝好的机会。

DPSSL 激光器及装置在民用方面，如激光精细加工及激光医疗方面有极大的市场潜力。而在军事应用领域，采用 808nm 大功率半导体激光器泵浦的小型化 Nd:YAG，已成为高技术战争中的重要手段之一，如激光测距、测速、光通信、激光制导、激光引爆、激光雷达、激光核引爆、激光受控核聚变及激光空间应用等诸多方面也有极广阔而重要的应用需求；激光武器不仅在战术上成功地发挥了作用，而且在战略武器中也将扮演极重要的角色。基于 DPSSL 的光电子武器有惊人的发展，例如，在海湾战争中这类精密制导武器占有 8~10% 比重，在“沙漠之狐”行动中则达到 70%，而在科索沃战争中已上升到 90%。目前 10W 级半导体激光器被美国列为禁运之列，可见在未来国家安全防务中，缺乏这类光电子武器，后果不堪设想。

1) 激光二极管泵浦的固体激光器的主要特性
二极管泵浦的固体激光器兼备了二极管激光器和固体激光器的优点，并相互弥补了对方的某些缺点，使得二极管泵浦固体激光器极大地优越于传统灯泵浦的固体激光器以及二极管激光器本身。

a) 激光二极管泵浦的固体激光器与传统灯泵浦的固体激光器比较

(1) 总体效率提高 5—10 倍，其电——光转换效率可达到 15% 以上（光——光转换效率可达到 40% 以上）；(2) 更高的频率稳定性和更窄的线宽，其频率稳定性和线宽已可以和气体激光器媲美；(3) 达到衍射极限光束；(4) 可靠性高，使用寿命大大延长，LD 连续工作寿命可达 $10^4 - 10^5$ h，远高于闪光灯泵浦的 400 多小时的寿命；(5) 小型化，外形尺寸缩小 80—90%，体积小，重量轻，供能简便，可全固化。

DPL 主要存在的问题是：输出辐射的能量和功率小，其价格还相当贵，随着激光二极管技术的发展，情况将会改变。

b) 激光二极管泵浦的固体激光器与二极管激

光器比较

二极管泵浦的固体激光器在很多方面弥补了 LD 自身的不足。

(1) 窄线宽,通常为 $0.02 \sim 2\text{nm}$,而固体激光器线宽通常为 $0.0001 \sim 0.01\text{nm}$; (2) 高峰值功率; (3) 发散角小,端面泵浦的 DPL 很容易做到基模衍射极限的光束; (4) 半导体激光器输出波长的不确定性,随温度升高而增长,漂移量为 $0.2 \sim 0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$,而 DPL 输出具有确定的输出波长; (5) DPL 可以制成多种新波长器件和特种器件。DPL 通过采用不同的激光介质以及频率变换技术,可以得到多种新的振荡波长,波长覆盖比 LD 宽,而且可以靠多个 LD 泵浦使输出功率比单个 LD 大,同时 DPL 可以有如双波长,可调谐等特种器件。而 LD 频率不易调节,限制了应用范围。

总之,DPL 比灯泵浦固体激光器效率更高,频率更稳定,谱线宽度更窄,寿命更长,结构简单,使用方便,可制成小体积全固化器件,以及 DPL 与非线性频率变换相结合可制成多种新波长器件等。所有这些优点,使其在激光雷达、激光制导、测距、光电对抗、水下通信、精密加工、集成电路修复、激光医学、激光武器、光盘存储等各个应用方面成为首选激光器,具有巨大的潜在应用前景。

2) DPL 的泵浦方式及分类

根据泵浦源激光二极管及其阵列的功率大小及输出光束特点,泵浦方式有纵向泵浦(又称端面泵浦)和横向泵浦(又称侧面泵浦)两种基本方式。一般输出功率在瓦级以下的大多采用简单的端面泵浦方式,要求泵浦光与固体激光谐振腔 TEM_{00} 模进行有效的模式匹配。输出功率在千瓦级以上的一般采用多个二极管阵列进行侧面泵浦。

激光晶体材料分为两大类,一类是以稀土离子为激活离子,一类是以过渡金属离子为激活离子。全固态激光器按运转方式可分为连续及脉冲激光器,连续激光器具有不同线宽,脉冲激光器按脉宽可分为自由运转、调 Q (ns)、锁模(ps 及 fs)激光器等。

1.5 可调谐固体激光技术

八十年代,固体可调谐激光器发展迅猛,掺钛蓝宝石、金绿宝石、色心、 Co:MgF_2 等可调谐激光器先后出现,其中尤为突出的是掺钛蓝宝石激光器的研究,下面以掺钛蓝宝石为例介绍可调谐固体激光器

技术的发展。

掺钛蓝宝石($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$,英文为 Titanium Sapphire,一般简称为钛宝石)激光器是一种新型顺磁子固体可调谐激光器,具有结构简单、调谐范围宽($660 \sim 1200\text{nm}$)、转换效率高、运转方便以及可用多种不同波长光源泵浦等许多突出的优点,在激光光谱、激光化学、激光遥感、激光雷达、非线性光学、大气光学等方面有着广泛的应用前景。钛宝石激光器是迄今为止输出光谱在红光和近红外波段调谐范围最宽的固体激光器之一,若辅之以非线性光学频率变换技术,还可大大扩展其输出光谱范围,使其特点更突出,性能更优越。

第一台钛宝石激光器于 1982 年问世,1986 年实现室温下运转,目前,钛宝石激光器已实现连续、准连续、脉冲、锁模以及全固化运转。

图 4 为倍频 Nd:YAG 激光泵浦的钛宝石激光器,获得了 $677 \sim 984\text{nm}$ 、单脉冲能量 20mJ 的输出,还可以采用双向泵浦方式,输出达到 157mJ ,能量转换效率约为 50%。

近年来,钛宝石激光器研究中发展最快、最具吸引力的课题是超短脉冲技术。由于钛宝石晶体的荧光光谱很宽,如果纵模全部锁定,无须采用另外的脉宽压缩技术,理论上可以产生 6fs 以下的超短脉冲输出,这是以往任何其它激光器无法比拟的。目前采用的锁模技术有很多种,如主动锁模、被动锁模、同步泵浦锁模、种子注入、辅助腔锁模及自锁模等。全固态是钛宝石激光器的一个重要发展方向,这种系统结构紧凑、体积小、效率高、寿命长,有着广泛应用前景。全固态钛宝石激光器一般用半导体阵列泵浦 Nd:YAG 或 Nd:YLF 产生 1064nm 激光,倍频后泵浦钛宝石激光器。钛宝石激光器的输出光调谐范围在红光及近红外波段,是目前发现的调谐范围最宽的激光光源之一,通过非线性光学频率变换技术进一步扩展其光谱范围,将使其性能更优越,应用前景更广阔。

2 非线性光学频率变换技术

激光谐波变换技术是激光及非线性光学领域的一个重要分支,通过频率变换能够获得各种波长的相干辐射,满足各种实际应用的需要。近年来,随着非线性光学及激光晶体的成熟,非线性光学频率变

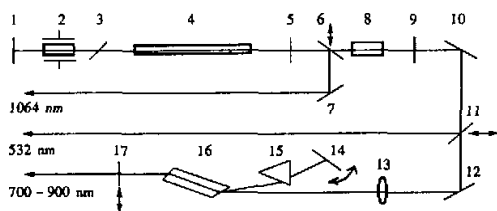


图4 脉冲钛宝石激光器光路图

1. 1064nm 全反镜; 2. KD*P-Q 开关晶体; 3. 起偏镜; 4. YAG 棒; 5. 1064nm 输出镜; 6, 7. 1064nm 45°全反镜; 8. KTP-SHG 晶体; 9. 1064nm 全反, 532nm 高透镜; 10, 11, 12. 532nm 45°全反镜; 13. 聚焦透镜; 14. 钛宝石激光全反镜; 15. 棱镜; 16. 钛宝石晶体; 17. 钛宝石激光输出镜。

换技术得到了飞速的发展。

2.1 光学参量振荡(OPO)技术

光学参量振荡器是利用非线性晶体的混频特性实现频率变换的器件,它既是非线性光学频率变换的器件,又是波长可调谐的光源,具有调谐范围宽、结构简单及工作可靠等特点,随着近年来一些新型而高效的非线性晶体的出现及发展,OPO 以其宽调谐范围、高效率、高重复频率、高分辨率及小型固体化等特点日益引起国际光学界的重视,已被广泛应用于各科研领域(如新材料、生物、化学及共振光谱等)。

八十年代以后,非线性晶体研究的重大突破使 OPO 进入了实用阶段。涌现出许多透明范围更宽、匹配波长更长的参量振荡晶体,如 KTP、BBO、LBO、KTA、MgO:LiNbO₃、AgGaSe₂、AgGaS₂、CdSe、ZnGeP₂、Urea、CsTiOAsO₄ 等。另外,值得注意的是近几年迅速发展起来的超晶格材料技术,为人们呈现了一种全新的准相位匹配(Quasi-Phase Match, QPM)光学参量振荡器。到目前为止,人们采用不同的泵浦波长、不同的非线性晶体及调谐方式,已实现 0.4~18μm 的宽调谐输出,谱线宽度一般达几个波数,激光脉宽由连续到纳秒、皮秒、甚至于飞秒量级。一般来说,单模、窄线宽、窄脉宽、高峰值脉冲泵浦的光学参量振荡器可获得较高的转换效率。

光学参量振荡器的谐振类型有单谐振和双谐振之分,相位匹配方式也有 I 类 II 类之别, OPO 已成为可调谐激光的主流,是实现可调谐激光输出的有效技术手段,它的发展趋势主要是:用组合调谐方式进行红外波段的扩展和紫外波段的延伸、PPLN 技

术、新型参振晶体的开发及全固态 OPO。目前,一些技术已趋于成熟,国际的一些大的光电公司已先后推出了商品化的 OPO 产品。

天津大学激光与光电子研究所采用 700~980nm 的脉冲可调谐钛宝石激光作为泵浦光,泵浦由一块 KTP 晶体组成的单谐振参量振荡器,采用 II (B)类相位匹配,通过改变泵浦光波长作为参量振荡器的调谐方式,根据泵浦光波长范围确定了 KTP 晶体最佳切割角度($\theta = 62.5^\circ$, $\varphi = 0^\circ$),通过更换 5 组参量谐振腔膜片,实验上获得了 1261~2532 nm 的宽波段连续调谐单谐振参量光输出,如图 5 所示。

总之,实践中对可调谐激光光源的强烈需求,使得光学参量振荡器得以迅速地发展,而光学参量振荡器的飞速发展又为可调谐激光开辟了更广阔的应用领域,并且在应用过程中对光学参量振荡器提出了更高的指标。随着 OPO 技术的不断成熟与发展,OPO 必将会进一步的充实激光的应用领域,让激光这一神奇之光更好的为人类造福。

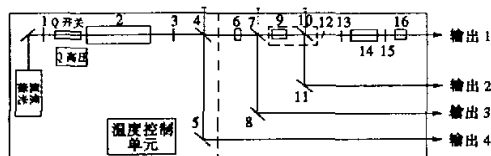


图 5

1. 1.06 微米全反镜 2. YAG 激光棒 3. 1.06 微米输出镜 4. 可推拉 1.06 微米 45°全反镜 5. 1.06 微米 45°全反镜 6. KTP 倍频晶体 7. 可推拉 0.532 微米 45°全反镜 8. 0.532 微米 45°全反镜 9. 三倍频晶体(BBO) 10. 0.355 微米 45°全反镜(与 9 一起构成可推拉结构) 11. 0.355 微米 45°全反镜 12. 1.06 微米全反及 0.532 微米高透镜 13. OPO 后向全反镜 14. OPO 晶体(MgO:LN) 15. OPO 输出镜 16. BBO 倍频晶体

2.2 高功率 RGB 激光技术

红(R)、绿(G)、蓝(B)激光光源有巨大的应用前景,就高功率(大于瓦级)的 RGB 激光光源而言,仅有气体与固体激光器两类。瓦级以上的高功率 RGB 激光器,采用 DPL 再加上非线性频率变换技术将是最佳方案。其中高功率绿光光源已达到百瓦量级,被认为是分离同位素铀中泵浦染料激光器的最佳光源。三种光源中,红、蓝激光光源技术难度较大。国际上红、蓝激光已达到 3~7W 的量级。实现红、蓝激光运转一般采用 ns、ps 的倍频 Nd:YAG 激光器为基础(输出基波 1064nm、二次谐波 532nm),再加上非线性频率变换(光学参量振荡器、倍频和

频)来实现红、蓝激光输出。

激光显示是投影显示领域的最新技术。由于激光的特性,它比其他显示技术具有更多的优越性:(1)超大屏幕、高亮度;(2)色域宽,高度饱和和色彩;(3)高分辨率,可在任意形状表面显示;(4)高对比度(>1000:1);(5)光缆导光、多通道投影、卫星式分布。因此,它是实现超大屏幕、高清晰度显示最有前途的技术之一。RGB 激光器是激光显示领域研究和开发的重点,如图 6 所示。目前国外已有激光大屏幕显示的产品,国内仅有单色激光演示的产品,尚无真彩色激光大屏幕显示产品。

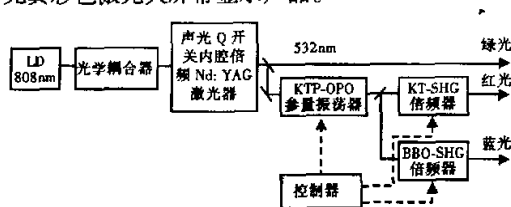


图 6

2.3 高次谐波发生

高次谐波辐射一直是非线性光学中的主要研究内容之一,利用谐波辐射是获得新激光谱线最主要的途径。近几年来,由于超短、超强激光技术的飞速发展,为谐波辐射研究提供了前所未有的技术支持。高次谐波的研究具有重要的实际应用价值,这是因为:1)高次谐波能够产生高度相干、脉宽极窄的 XUV 和 X 射线源。目前,利用超短(仅为几个光周期)超强激光脉冲与惰性气体介质相互作用产生的高次谐波已经成功地进入了“水窗”波段,这对于活的生物细胞和亚细胞结构的显微成像具有重大意义。2)高次谐波辐射脉冲持续时间短(可达到飞秒量级)、频带宽、波长可调谐的特点,使得它在需要高的时间和空间分辨的微观快过程研究领域有着广泛的应用,例如激光等离子体诊断,原子内壳层的光电离和双光子电离,材料科学和化学中的表面物理和化学,半导体的全息光刻,原子团簇的电子和几何结构等。其次,高次谐波辐射是人们实现阿秒相干脉冲的首选光源,自从激光出现以后,脉冲持续时间的突破日新月异,它影响着化学、物理学和生物学中的测量手段的更新以及对未知领域的深入。3)高次谐波的研究对强场物理的研究有着强大的推动作用。由于激光技术的飞速发展,人们利用台式激光器,获得的电场强度已经可以达到甚至超过原子单位电场

强度。这些强场的实现直接推动了各个学科的发展,开辟了许多全新的物理学领域。研究强场物理学的目的是发现并解释物质在(超)强外场这种极端物理条件下所辐射的各种强场效应(如高次谐波辐射,强场自电离,电离抑制和库仑爆炸等),建立和发展新的非微扰理论。高次谐波辐射的研究是检验强场物理理论合理性的一个重要工具,同时也不断为强场物理理论提出新的课题,因此,可以说高次谐波研究是深入认识强场物理本质的一个重要手段。

Michigan 大学的实验小组利用脉宽仅为 26fs (十个光周期)的 780 nm 激光脉冲与 He 相互作用,观察到了 297 次谐波辐射。Vienna 技术大学的实验小组利用脉宽仅为 5fs (二个光周期)的 780 nm 激光脉冲与 He 相互作用观察到的谐波辐射波长也小于 3nm,成功地进入了“水窗”波段,这可以看成是高次谐波实验研究的一个里程碑。总之,高次谐波幅射是产生超短脉冲 XUV 和 X 射线相干辐射光源的主要途径之一,具有广阔的应用前景和重大的理论价值。如何获得更短波长的谐波和提高谐波的转换效率仍然是强场高次谐波研究的主要方向。但是不得不指出的是,高次谐波研究离实际应用还有着很大的差距,主要原因在于高次谐波幅射的能量转换效率太低。

2.4 准相位匹配(QPM)技术

1) 基本原理

准相位匹配技术拓宽了非线性晶体的应用范围,大大提高了非线性光学转换效率,已成为非线性光学材料和固体激光器领域的研究热点之一。

准相位匹配是在“介电体超晶格”中实现。所谓介电体超晶格,是指在介电晶体中引入可与经典波(光波和声波)波长相比拟的超周期结构,此种晶体也被称为光学超晶格、声学超晶格或微米超晶格。通常我们用超晶格倒格矢来描述超晶格,其方向垂直于片畴,大小为, $k_m = 2\pi \cdot m / (a + b)$, a 、 b 分别为正、负畴的厚度, $\Lambda = a + b$ 为超晶格的周期, m 为整数,称为初基倒格矢。通过调节超晶格的倒格矢,即调节超晶格的周期,可以弥补由于折射率色散而产生的波矢失配,这就是“准相位匹配”。利用周期极化晶体来实现准相位匹配是一种有效而简便的方法。实践证明,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,并且能够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。常见的用于准相位匹配的周期极化晶体有 PPLN (周期极化 LiNbO_3)、PPKTP (周期极化 KTP)、PPRTA (周期极化 RbTiOAsO_4) 及 PPLT (周期极化 LiTaO_3) 等。图 7 为周期极化晶体。

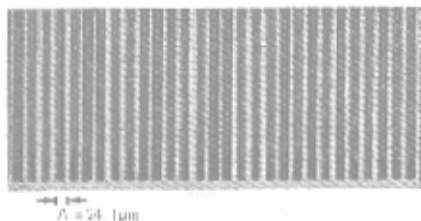


图 7 PPRTA 晶体结构示意图

从光波与非线性介质相互作用的经典电磁场理论出发,在非线过程中,对三波耦合的情况,设参与相互作用的三波频率分别为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, 频率 ω_1, ω_2 和 ω_3 必须满足能量守恒准则,即 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$, d_{eff} 为有效非线性系数,它与介质的性质和匹配方式有关;由于材料的色散,相速度是频率的函数,从而导致了随频率变化的相位关系,单位长度的相位变化用相位失配量 $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1$ 表示; $k_j = \omega_j n_j / c$ ($j = 1, 2, 3$) 是对应折射率为 n_j 的光波的波矢量; n_j ($j = 1, 2, 3$) 介质中各光波的折射率。图 8 是周期极化晶体结构及 QPM 原理示意图,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相反,这等效于第二片铁电畴物性张量对第一片铁电畴物性张量而言,其坐标系统绕 x 轴旋转了 180° ,因而与奇数阶张量相联系的电畴的物理性质,如非线性光学系数、电光系数、压电系数等(包括所有与奇数阶张量相联系的物性常数),都是同值,而符号由“+”变为“-”,因此此类单晶体的物理性质不再是常数而是空间坐标的周期函数。如果其周期可与经典波波长比拟,就成为我们前面所说的光学超晶格。利用周期极化晶体实现准相位匹配,由于对晶体的自发极化方向进行了周期性调制,使得在有效非线性系数中引入了一个空间调制函数,我们把新的有效非线性系数用傅立叶级数表示为(注:此处的 z 向为通光方向,并非晶体的 z 轴):

$$d_{\text{eff}}(z) = d_{\text{eff}} \cdot \sum_{m=-\infty}^{+\infty} G_m e^{-ik_m z}$$

其中 $m (=1, 3, 5, \dots)$ 为准相位匹配阶数, k_m 是极

化周期引入的倒格矢。

如果只考虑某一阶准相位匹配,则可简化为:

$$d_{\text{eff}}(z) = d_{\text{eff}} \cdot G_m e^{-ik_m z}$$

由周期方波信号的傅立叶变换可知:

$$G_m = \frac{2}{m\pi} \sin(m\pi D)$$

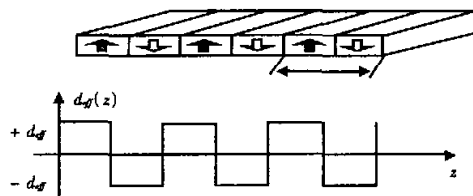


图 8 周期极化晶体结构及 QPM 原理示意图

D 为反转畴的占空比系数,一般情况下 $D = 0.5$ 。

将 $d_{\text{eff}}(z)$ 的表达式代入到耦合波方程中得到 QPM 的相位失配量为:

$$\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 - k_m \quad (m \text{ 为奇数})$$

因此,对准相位匹配来说,欲使相位失配量 $\Delta k = 0$, 只需使得极化周期满足:

$$\Lambda = \frac{2\pi \cdot m}{k_3 - k_2 - k_1} \quad (m \text{ 为奇数})$$

我们知道,相干长度可以用下式表示:

$$l_c = \frac{\pi}{k_3 - k_2 - k_1}$$

所以,可以简单地说,利用周期极化晶体实现准相位匹配,就是以 $2l_c$ 的奇数倍为周期,周期性地改变 LiNbO_3 等铁电材料的自发极化方向来补偿相位失配,从而在整个周期极化晶体长度内实现转换效率的持续增长。图 9 是实现一、三阶准相位匹配的周期极化晶体的结构示意图。

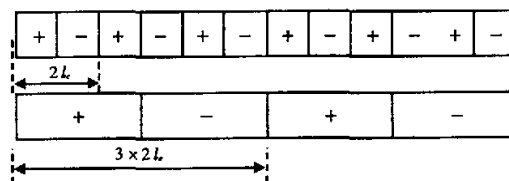


图 9 实现高阶相位匹配的极化结构

与双折射相位匹配技术相比,准相位匹配没有双折射相位匹配中关于波矢方向和偏振方向的限制,通过选择适当的极化周期,就可以实现相位匹配。

2) 准相位匹配(QPM)的优点

a) 理论上能够利用晶体的整个透光范围;b) 可避免空间走离效应;c) 可以利用晶体的大的非线性系数;d) 可以设计成非临界相位匹配;e) 非线性转换效率高;f) 调谐方式简单、多样。我们只需在非线性晶体中设计制备出各种不同周期的畴结构,通过改变极化周期、通光方向和晶体温度就能十分方便地实现输出光波长的可调谐。

总之,QPM技术的最大优点是非线性转换效率高,并且可以使那些在通常条件下无法实现相位匹配的晶体和通光波段得以实现频率变换,拓宽了应用范围,增加了调谐方式,使宽波段激光的输出成为可能。

3) 准相位匹配(QPM)的应用趋势(以 OPO 及光脉冲压缩应用为例)

a) 周期极化晶体的准相位匹配光学参量振荡器(QPM-OPO)

将周期极化晶体的周期波矢(即倒格矢)引入光学参量振荡过程,同样可以满足相位匹配条件。目前,最常见的实现 QPM-OPO 的最为理想的铁电材料为 LiNbO_3 晶体,该晶体通光范围 $0.4 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 区间,覆盖了近、中红外区域。图 10 是 1064nm 的 Nd:YAG 激光器去泵浦 PPLN,实现一阶共线 QPM 光学参量振荡时,所产生的信号光和空闲光与极化周期的关系曲线(即 OPO 的波长-周期调谐曲线)的示意图。QPM-OPO 产生的红外波段光源,在军事对抗、大气环境监测、医学、特殊环境远距离监控以及光谱学研究等诸多领域都有着十分重要的应用价值。

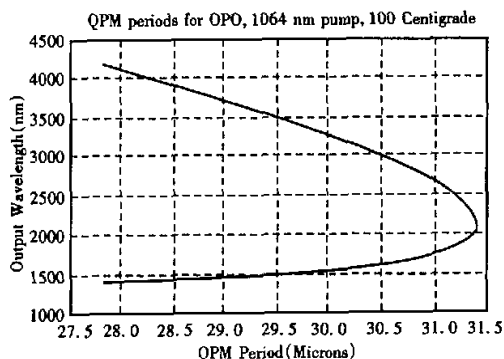


图 10 1064nm Nd:YAG 泵浦的 PPLN-OPO 调谐曲线
利用 PPRTA 晶体也可以将输出扩至 $5.0 \mu\text{m}$ 。

D. T. Reid 和 G. T. Kennedy 等人实现了基于 PPRTA 的皮秒和飞秒光学参量振荡器,在 Ti:Sapphire 激光器泵浦下,室温条件获得了 $1 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 和 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段的宽调谐输出。下图是 PPRTA-OPO 的调谐曲线和相位匹配宽度曲线,所有光波均平行于 z 轴偏振。现在,基于周期极化的 LiNbO_3 、 KTiOPO_4 (PPKTP)、 KTiOAsO_4 (PPKTA) 和 Rb-TiOAsO_4 (PPRTA) 晶体的光学参量振荡器都已实现。

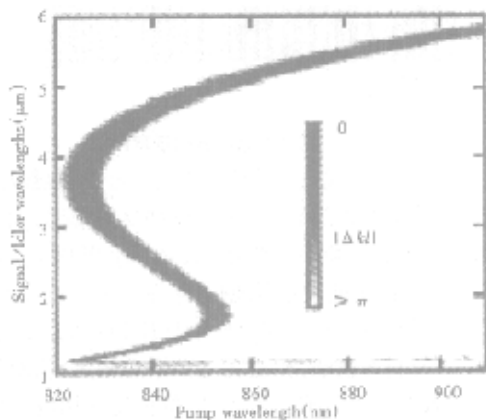


图 11 PPRTA-OPO 的调谐曲线和相位匹配宽度曲线

b) 啁啾周期极化 LiNbO_3 晶体实现光脉冲压缩

在超快、超强激光系统中,关键的一个因素是有效地控制超短脉冲传输过程中的色散。传统的色散方法包括光栅对、棱镜对、周期折射率结构的布拉格体光栅、光纤模式色散以及啁啾反射镜等。随着人们对 QPM 技术认识的逐渐深入和周期极化晶体制备工艺的成熟,理论研究和实验结果都使人们发现啁啾周期极化 LiNbO_3 晶体(chirped-period-poled lithium niobate,简称 CPPLN)可以作为一种新的色散控制技术来实现光脉冲压缩。研究表明,只要满足准相位匹配,超快脉冲激光通过简单的啁啾周期极化晶体,就能在完成频率转换的同时实现光脉冲的压缩和放大。其优点是:可以提供足够大的 GVD 对脉冲进行色散控制,能完成超高功率光脉冲处理。

我们把利用准相位匹配实现的非线性频率变换过程总结于表 1;对一阶共线准相位匹配而言,不同的非线性过程所用的典型的极化周期值总结于表 2。

表 1 利用 PPLN 准相位匹配实现的非线性频率变换过程

Process	Input Wavelength(s)	Output Wavelength(s)
Optical parametric oscillation (OPO)	λ_3	λ_2, λ_1
Difference frequency generation (DFG)	λ_3, λ_2	λ_1
Sum frequency generation (SFG)	λ_1, λ_2	λ_3
Second harmonic generation (SHG)	$\lambda_1 = \lambda_2$	λ_3

表 2 利用 PPLN 实现一阶共线准相位匹配所用的典型极化周期值

Period Range	Typical Applications
1. Short ($\Lambda < 15 \mu\text{m}$)	SHG, SFG of near-IR lasers; OPO pumped by visible lasers
2. Intermediate ($15 \mu\text{m} < \Lambda < 25 \mu\text{m}$)	DFG of near-IR lasers; SHG of communications lasers
3. Long ($\Lambda > 25 \mu\text{m}$)	OPO pumped by near-IR lasers

4) 周期极化技术发展趋势

目前,周期极化技术的发展趋势是充分利用 QPM 技术可人为设计周期结构这一优势,实现更为灵活的晶体结构。已研制出在晶体的不同区域制备出不同的极化周期,获得高次谐波、可调谐波长或多波长相干光输出。

a) 准周期极化晶体

准周期极化晶体,是由两种不同周期的结构按某种特殊规律串接而成的。此结构中存在多组倒格矢,且可通过适当的结构参数来调节。因而,经过特殊设计,选取具有多种特定倒格矢的准周期极化晶体,就能同时完成倍频、差频、混频和光学参量振荡等各种非线性转换,大大简化了光学系统的体积及操作难度。美国光波电子公司在一块 PPLN 晶体上完成了 OPO—SHG 和 OPO—SFG 过程。南京大学也利用 QPM 技术在 LiTaO_3 晶体上实现了 SHG 和 SFG 的耦合。通过在准周期极化晶体中的二次谐波过程和频率上转换过程的耦合,就可以利用目前的二次非线性介质材料实现三次、四次甚至更高次谐波的输出,使操作和调试过程大大简化,同时理论分析表明,转换效率也有很大的提高。

b) 多周期极化晶体(multiple grating)

多周期极化晶体,是由多个不同周期的结构沿 y 方向“并联”而成的(晶体沿 z 轴极化,通光方向为 x 轴)。图 12 是多周期 PPLN 的 $+z$ 方向的局部俯视图,此晶体由 25 个周期为 $26 \sim 32 \mu\text{m}$ 的周期结构组成,每一部分的宽度为 $500 \mu\text{m}$,间隔为 $50 \mu\text{m}$ 。

应用多周期极化晶体实现 OPO,通过调节泵浦光束和晶体的横向相对位置,即可获得大波长范围的调谐输出。其优点是调谐机构简,输出波长范围

大,还有 QPM 本身所有的转换效率高的特点。图 13 是其谐振腔示意图。



图 12 多周期 PPLN 结构示意图(+z 表面)

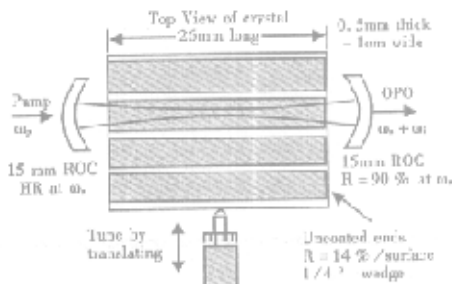


图 13 基于多周期 PPLN 的 OPO 谐振腔示意图

c) 扇形周期极化晶体(fan-out grating or fan grating)

普通的周期极化晶体反转畴壁平行于 Y 轴,扇形极化晶体的反转畴壁做成“扇形”结构,畴壁与 Y 轴有一倾角,这样沿 Y 向周期间距保持连续增加(如图 14 所示)。因此只需调整泵浦光束和扇形极化晶体在谐振腔中的横向相对位置,就可方便地实现波长的连续可调谐输出。同一般的通过控制晶体温度来改变输出波长的方法相比,此方法的输出波长范围大,操作简便,精度也较高。

现在,QPM 技术已从最初的倍频发展到了和频、差频、OPO、光脉冲整形以及全光开关、波长变换

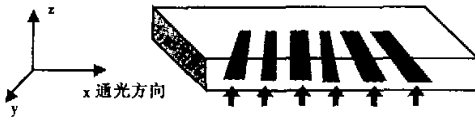


图 14 扇形周期极化晶体的结构示意图

等非线性光学应用领域。相信通过对准相位匹配的物理机制、周期结构的设计进行更深入的研究和探索,一定会使准相位匹配技术在非线性光学频率变换方面,尤其在产生宽带的可调谐相干光源和波长

变换方面展现出更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 姚建铨.《非线性光学频率变换及激光调谐技术》. 科学出版社, 1995
- [2] L. E. Myer, R. C. Eckardt, M. M. Fejer, et al. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO₃. J. Opt. Soc. Am. B, 1995, 12(11): 2102-2116
- [3] L. E. Myer, Review of quasi-phase-matching and periodically poled lithium niobate, Aerospace and Electronics Conference, 1996. NAECON 1996., Proceeding of the IEEE 1996 National, 1996(2): 733-739

作者简介

姚建铨 (YAO Jianquan, 1939, 1-), 男, 1965 年天津大学研究生毕业, 现为天津大学教授, 博士生导师, 天津大学精仪学院名誉院长、激光与光电子研究所所长, 中国科学院院士。中国光学学会理事, 激光专业委员会副主任, 教育部电子信息与电器学科教学指导委员会副主任, 电子科学与技术专业指导委员会主任。长期从事激光及非线性光学频率变换技术研究, 在高效倍频激光器、高功率固体激光器、可调谐激光器、非线性光学及激光应用技术等方面达到国际先进水平, 在激光与光电子领域提出并发展了非线性双轴晶体最佳相位匹配计算理论, 被国际学术界称为“姚技术”、“姚方法”, 在国际上率先建立了“双轴晶体最佳相位匹配—高功率倍频激光器—准连续泵浦激光调谐系统的技术体系”, 在国内外激光学术界享有一定声誉。已完成科研项目 40 多项, 发表论文 350 余篇。曾获国家发明二等奖, 国家教委及天津市科技进步二等奖(4 次), 中科院特等奖, 军队科技进步一等奖及国际尤里卡发明金奖(个人获一级骑士勋章)等。

(责任编辑: 房俊民)

国外新闻

美宇航局确定“小探索者计划”新任务

D

美国宇航局近日发布新闻公报宣布, 探测宇宙热气分布情况和观察地球大气最高云层两个项目将作为“小探索者计划”(SMEX)未来的两项任务。

美国宇航局官员说, “自从‘探索者 1 号’40 多年前升空, 发现范艾伦带(放射带)以来, 探索者系列飞船已经以最低的成本获得了显著的科学成果。我们这次选择的两个项目会继续这一传统, 通过空间观察来解决空间科学领域最基本的问题。”

根据美国宇航局的计划, 执行第一项任务的飞船将于 2005 年发射, 以观测散布于宇宙中的热气。据介绍, 近宇宙有一半的正常物质处于热气的包围中, 这一飞船将首次观测热气的分布情况。获得的数据将帮助天文学家回答星系等

宇宙中大型结构形成、演化的基本问题。这个预计耗资 8900 万美元的项目由波士顿大学负责。

执行第二项任务的飞船定于 2006 年发射。目前有迹象显示, 近几十年来, 在地球极地上空高层大气中的云层数量增加, 有人猜测这是高空温室气体浓度增加的结果。这一飞船将在云的形成区域测量大气温度、水蒸气浓度等指标, 以确定云和环境的联系, 有关数据还将被作为长期研究的高层大气的基准指标。这项计划预计将耗资 9200 万美元。

“小探索者计划”是利用中小型太空飞船, 以较低的成本增加接触太空的机会, 完成物理学和天文学的任务。自 1992 年以来, 美国宇航局已经发射 6 艘“小探索者计划”飞船, 其中 5 艘仍在运转并不断传回科学数据。(新华社供本刊稿)