

全固态多光参量振荡 激光技术研究

Study on Solid-state Multi Optical Parametric Oscillator Laser Technology

于永吉 金光勇 著



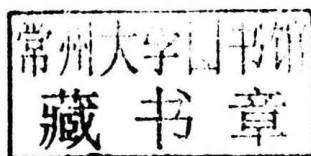
国防工业出版社
National Defense Industry Press

非
外
借

全固态多光参量 振荡激光技术研究

Study on Solid-state Multi Optical
Parametric Oscillator Laser Technology

于永吉 金光勇 著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要讲述了全固态多光参量振荡激光技术的应用背景和发展趋势以及作者近年来在该领域取得的一些研究成果,包括多重准相位匹配超晶格材料极化结构设计,多光参量振荡器输出特性及调谐特性研究,特别对多重准相位匹配技术、电场调谐技术进行了阐述,并进一步分析了多光参量振荡过程能量逆转换问题,并介绍了基于电场调控的逆转换抑制新方法。

本书既可作为高等院校有关专业的教学参考书,也可供本领域科技工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

全固态多光参量振荡激光技术研究/于永吉,金光勇著. —
北京:国防工业出版社,2018.2

ISBN 978-7-118-11576-5

I. ①全… II. ①于… ②金… III. ①光振荡器—
应用—激光技术—研究 IV. ①TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 056537 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12¼ 字数 232 千字

2018 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前言

光学参量振荡技术是激光领域的一个重要技术分支,是近年来获得近、中红外可调谐激光的主要技术手段,这种激光在军事、医疗、通信等领域均有广泛应用。多光参量振荡是实现同光谱区域激光多波长同步可调谐的有效途径,这一概念的提出,不仅延展了多波长激光的光谱覆盖范围,而且极大拓宽了光学参量振荡技术的应用范畴。针对目前多光参量振荡器技术上的局限及欠缺,本书重点开展了一种基于多重准相位匹配实现多光参量振荡的全新技术研究,对于多光参量振荡激光技术未来的推广、应用具有重要研究意义和价值。

本书总结了近几年国内外光学参量振荡器的研究进展以及多光参量振荡激光技术的最新研究成果,提供了大量的资料、图表及数据,既有系统的理论分析、数据计算结果,又有具体激光器的设计参数及实验结果。全书分为8章,具体内容如下。

第1章全固态多光参量振荡器概述。介绍了连续与脉冲两种运转方式的准相位匹配光学参量振荡器目前国内外研究现状,总结了三种实现多光参量振荡及输出技术的研究进展情况,指出开展全新运转体制多光参量振荡器研究的必要性。

第2章多重准相位匹配超晶格极化结构设计。基于多重准相位匹配理论,以近化学计量比 MgO 掺杂 LiNbO_3 为基质,采用斐波拉契二组元投影法和模拟退火算法优化设计了准周期与非周期形式极化结构,在单块晶体内形成两个倒格矢,实现对 $1.57\mu\text{m}$ 、 $3.3\mu\text{m}$ 和 $1.47\mu\text{m}$ 、 $3.84\mu\text{m}$ 两对参量光的同時相位补偿。

第3章多光参量振荡器理论分析及参数优化。主要针对内腔连续泵浦和外腔脉冲泵浦两种工作形式的多光参量振荡器,由相应的动力学模型、增益特性、阈值特性、腔模匹配等入手,进行了光参量振荡器耦合透过率、泵浦功率、腔型结构等相关重要参数的理论分析及模拟优化,给定了最佳取值范围。

第4章内腔连续泵浦多光参量振荡器实验。实验对比分析了内腔连续泵浦多光参量振荡器不同极化结构、不同耦合输出镜透过率、不同泵浦参数对多光参量振荡器输出性能的影响。

第5章外腔脉冲泵浦多光参量振荡器实验。分别采用高重频声光调Q和双

RTP 电光 Q 激光器作为基频光源,开展了基于这两种泵浦源外腔脉冲泵浦 MgO:APLN 多光参量振荡器实验研究以及双 MgO:PPLN 晶体串接多光参量振荡器比对实验研究。

第 6 章多光参量振荡器电场调谐特性理论与实验。基于 LiNbO_3 基质材料的线性电光效应,理论研究了 MgO:QPLN/APLN 电场调谐能力与极化结构参数间的关联性,通过对 QPLN 通道加载 z 向电场验证了电场调谐多光参量振荡器的技术可行性,并与传统温度调谐进行量化对比,由对比结果阐明了电场调谐技术特点及优势。

第 7 章多光参量振荡过程中的逆转换问题。针对实验中出现的逆转换现象做了进一步的理论分析与方案设计,通过耦合波方程对光参量振荡器多波耦合过程进行了数值演化,分析了最佳晶体长度、泵浦功率密度、空域泵浦光斑形貌、时域脉冲宽度等方面对多光参量振荡过程中逆转换作用的影响。

第 8 章主要对本书研究工作进行总结和展望。

由于作者学识水平有限,书中难免存在错误和不足之处,恳请读者见谅并批评指正,不胜感谢。

于永吉

2017 年 12 月于长春

目 录

第 1 章 全固态多光参量振荡器概述	1
1.1 研究背景与意义	1
1.1.1 光学参量振荡器发展现状	1
1.1.2 多光参量振荡器概念	5
1.1.3 多光参量振荡器研究意义	7
1.2 准相位匹配光学参量振荡器研究概况	8
1.2.1 连续运转的 QPM-OPO 国内外研究现状	9
1.2.2 脉冲运转的 QPM-OPO 国内外研究现状	12
1.3 准相位匹配多光参量振荡器研究进展	19
1.3.1 多晶体串接 QPM-MOPO 研究进展	20
1.3.2 周期级联 QPM-MOPO 研究进展	22
1.3.3 单周期二次泵浦 QPM-MOPO 研究进展	26
1.4 小结	28
第 2 章 多重准相位匹配超晶格极化结构设计	29
2.1 引言	29
2.2 准相位匹配理论	29
2.2.1 相位匹配原理	29
2.2.2 准相位匹配技术原理	30
2.2.3 准相位匹配技术特点	34
2.3 多重准相位匹配技术	36
2.3.1 多重准相位匹配理论概述	36
2.3.2 多重准相位匹配准周期极化结构	39
2.3.3 多重准相位匹配非周期极化结构	42
2.4 铌酸锂超晶格材料基本特性	44
2.4.1 LiNbO_3 晶体极化结构及其掺杂属性	44

2.4.2	LiNbO ₃ 超晶格物化性质与光学特性	46
2.5	MgO:QPLN/APLN 极化结构设计	49
2.5.1	MgO:QPLN 极化结构设计	49
2.5.2	非周期极化结构设计的优化算法	52
2.5.3	MgO:APLN 极化结构设计	54
2.6	小结	64
第 3 章	多光参量振荡器理论分析及参数优化	65
3.1	引言	65
3.2	内腔连续泵浦 MOPO 的参数优化	65
3.2.1	内腔连续泵浦 MOPO 的动力学模型	67
3.2.2	内腔连续泵浦 MOPO 谐振腔设计及优化	70
3.3	外腔脉冲泵浦 MOPO 的参数优化	81
3.3.1	外腔脉冲泵浦 MOPO 参量光增益	83
3.3.2	外腔脉冲泵浦 MOPO 阈值分析	86
3.3.3	外腔脉冲泵浦 MOPO 转换效率与阈值关系	90
3.3.4	外腔泵浦光束聚焦与腔模匹配优化	93
3.4	小结	98
第 4 章	内腔连续泵浦多光参量振荡器实验	99
4.1	引言	99
4.2	内腔连续泵浦多光参量振荡器实验装置	99
4.3	内腔连续泵浦多光参量振荡器输出特性测量	104
4.4	内腔连续泵浦多光参量振荡器实验结果分析	110
4.5	小结	115
第 5 章	外腔脉冲泵浦多光参量振荡器实验	116
5.1	引言	116
5.2	外腔脉冲泵浦多光参量振荡器实验装置	116
5.3	高重频 1064nm 脉冲泵浦源实验研究	119
5.3.1	808nm 泵浦 Nd:YVO ₄ 高重频 RTP 电光调 Q 激光器	119
5.3.2	880nm 泵浦 Nd:YVO ₄ 高重频声光调 Q 激光器	125
5.4	外腔脉冲泵浦多光参量振荡器输出特性测量及分析	130
5.5	双晶体串接多光参量振荡器对比分析	140

5.6 小结..... 142

第 6 章 多光参量振荡器电场调谐特性理论与实验..... 143

6.1 引言..... 143

6.2 多光参量振荡器电场调谐特性理论研究..... 143

6.2.1 LiNbO₃ 材料的线性电光效应..... 143

6.2.2 LiNbO₃ 超晶格实现电场调谐的条件分析..... 147

6.2.3 基于 MOPO 的电场调谐特性理论模拟..... 149

6.3 多光参量振荡器电场调谐特性实验研究..... 157

6.3.1 多光参量振荡器电场调谐装置设计..... 157

6.3.2 多光参量振荡器电场调谐实验测量与分析..... 159

6.4 小结..... 162

第 7 章 多光参量振荡过程中的逆转换问题..... 163

7.1 引言..... 163

7.2 逆转换成因及影响因素分析..... 163

7.2.1 逆转换现象产生原理..... 163

7.2.2 MOPO 逆转换过程演化分析..... 165

7.2.3 MOPO 逆转换影响因素分析..... 168

7.3 电场调控 MOPO 逆转换方案构想..... 173

7.3.1 LiNbO₃ 材料 y 向电光效应..... 173

7.3.2 基于 PPLN 极化结构 Solc 型滤波器原理..... 174

7.3.3 电场调控 MOPO 逆转换方案设计..... 176

7.4 小结..... 178

第 8 章 总结与展望..... 179

8.1 本书研究工作总结..... 179

8.2 未来研究工作展望..... 180

参考文献..... 181

第 1 章 全固态多光参量振荡器概述

1.1 研究背景与意义

作为 20 世纪最伟大的发明之一，激光的出现无论从科技层面还是民生层面，都极大地改变了人类的生活。激光二极管（Laser Diode, LD）泵浦的固体激光器即全固态激光器（Diode Pump Solid State Laser, DPSSL）作为多种激光形成体制中的一种，兼顾有半导体激光器和固体激光器的优点并弥补了各自的不足，是获得高效率、高光束质量、高稳定性相干光源的重要手段。进入 20 世纪 80 年代以来，伴随量子阱结构半导体管芯工艺的提高和新型激光晶体材料的发展成熟，DPSSL 逐步占领了激光行业的主导地位，应用遍及工业、医疗、军事、科学研究等领域。

传统 DPSSL 由于增益介质荧光谱线的限制，激光器的发射谱线多处于 $0.6 \sim 3\mu\text{m}$ 之间（红宝石的激发谱线为 694.3nm ，高掺杂 Er:YAG 的激发谱线为 $2.94\mu\text{m}$ ），且在此区间内谱线为非连续分布。自 20 世纪 80 年代后，随着光学全息、生物医疗、光谱分析、激光雷达、光电对抗等技术的蓬勃发展，迫切需要拓展 DPSSL 的频谱覆盖范围，这直接促进了倍频、和频、光参量振荡、拉曼频移等一系列非线性光学频率变换技术的迅速崛起。其中，光参量振荡技术是产生宽带可调谐相干激光光源的有效途径，依托此技术研发的光学参量振荡器（Optical Parametric Oscillator, OPO）具有调谐范围宽、调谐方式灵活多样、易于整机全固化等优点，是近年来激光非线性变频领域的重要研究方向和研究热点之一。

1.1.1 光学参量振荡器发展现状

1962 年 Kingston^[1, 2]、Korll^[3]等人首先提出了光参量振荡理论，与利用原子或分子能级间的反转粒子跃迁所带来的能量增益，进而克服腔内损耗建立激光的理论类似，光学参量振荡器同样是依靠提供增益克服损耗来实现激光频率变换的，只不过这个增益来源于二阶非线性介质中参与相互作用的三波耦合电磁场，而非线性介质本身并不参与该过程的能量转换，只是提供一个“媒介”。

这个参量振荡过程每湮灭一个高频率泵浦光子，同时产生两个低频段光子，通常将波长相对较短的定义为“信号光”，另一个长波定义为“闲频光”，统称为“参量光”，由振荡腔对泵浦光和参量光形成持续反馈，整个过程近似等效为对参量光的多次差频放大，最终将参量光从腔内噪声中萃取出来。如何在腔内众多参量光噪声中建立起所需波段激光，需要对非线性介质辅助以相位匹配，以此保证互作用三波间具有相同的相速度，提高所需参量光的变频效率。由此可见，光学参量振荡器的发展与非线性介质材料及相位匹配技术的进步密切相关。表 1-1 简要列出了近年来，有代表性的非线性参量变频材料特性、典型运转方式和相位匹配条件。

表 1-1 非线性参量变频材料特性、典型运转方式和相位匹配条件

材料名称	透光范围 / μm	$d_{\text{eff}}/(\text{pm/V})$	损伤阈值 $/(\text{GW}/\text{cm}^2)$	泵浦波长 / μm	匹配条件	调谐方式
BBO	0.19~2.6	1.94	1.5	0.355	双折射 相位匹配	角度调谐 温度调谐
KTP	0.35~4.5	3.64	0.5	1.06		
ZGP	2.0~12.0	75	30	2.1		
AgCaS ₂	0.5~13.0	37.4	0.03	1.06		
AgCaSe ₂	0.5~15.0	13.4	0.03	2.0		
PPKTP	0.35~4.0	10.8	0.9	0.532	准相位匹配	角度调谐 温度调谐 波长调谐 周期调谐
OPGaAs	0.9~17.0	94	0.034	2.05		
PPLN	0.35~5.0	16	0.3	1.06		
MgO:PPLN	0.35~5.2	27.4	0.46	1.06		
MgO:PPLT	0.28~5.5	8.4	1.2	1.06		
注：①此处损伤阈值对应条件为 1.064 μm , 10ns						
②此处泵浦波长特指近年来文献中普遍报道所采用的泵浦源输出波长						

双折射相位匹配技术包含有角度（临界）和温度（非临界）两种相位匹配形式，二者均为利用单轴或双轴非线性光学晶体的双折射特性和色散特性，通过选择光波的偏振方向和波矢方向来实现相位匹配，是由 kleinman^[4]等人最先提出的，伴随 BBO、KTP、ZGP 等一批优质双折射晶体材料的相继发现，该技术已广泛应用于 DPSSL 泵浦的光学参量振荡器，波长调谐范围由紫外直至远红外。特别指出的是，基于 ZGP、AgCaS₂、AgCaSe₂ 晶体的 3~5 μm 、8~12 μm 中远红外光学参量振荡器，由于输出激光波段恰好位于大气传输窗口，对雾、烟尘等具有较强的穿透力，同时还处于 InSb、HgCdTe 等红外探测器的响应范围内，是激光制导与干扰、遥感探测、激光雷达等军事应用方面的核心光源器

件，另外，空气层内多数气体分子的基频振动吸收谱集中于 3~12μm 中远红外区域，这些特征光谱区的存在使得该波段激光在民用有毒气体检测、食品和农产品检测等方面同样有着巨大应用潜力，因此，该方面的研究备受重视，是近年来各国从事激光技术研究的科研机构关注的热点领域。表 1-2 列出了双折射相位匹配中远红外光学参量振荡器的代表性成果。

表 1-2 双折射相位匹配中远红外 OPO

OPO 晶体	泵浦源	泵浦波长	调谐范围	输出功率	转换效率	参考文献
ZGP	Ho:YAG	2.09μm	3~5μm	27.1W	62%	[5]
AgCaS ₂	Nd:YAG	1.06μm	3.9~11.3μm	372μJ@6μm	22%	[6]
AgCaSe ₂	LN-OPO	1.82μm	2.15~12μm	—	1.75%	[7]

正单轴磷锗锌（ZnGeP₂, ZGP）晶体具有高抗光伤阈值、大非线性系数和高热导率（35W/K·cm），一直是双折射相位匹配大功率中红外激光器的首选材料。2013 年澳大利亚国防科技组织（DSTO）的 Alexander Hemming^[5]等人采用一对大功率掺 Tm³⁺光纤激光器泵浦串接 Ho:YAG 棒，通过电光调 Q 方式获得了高重频 2.09μm 激光，继续泵浦 ZGP-OPO，成功实现平均功率 27.1W、光束质量 M²=4 的 3~5μm 中红外激光输出，实验装置如图 1.1 所示，这是至今为止报道的双折射相位匹配中红外 OPO 获得的最高输出功率。负单轴硫镓银（AgCaS₂）和硒镓银（AgCaSe₂）晶体相比于 ZGP，具有更宽的光谱调谐范围^[6,7]，但较低的抗光伤阈值和较差的导热能力大幅限制了其应用，相关的报道也仅是停留在中小功率水平。

尽管双折射相位匹配技术在各个光谱区域都得到了全面展示和广泛应用，但这种匹配方式同样也存在一定的技术壁垒，过分依赖于晶体材料的固有特性就是其无法克服的难点问题。对于某种具体的非线性晶体材料而言，只能在有限的波段范围内完成双折射相位匹配，而在双折射相位匹配满足的条件下，有效非线性系数不仅与通光方向有关，还与相互作用光的偏振方向有关，且存在能量走离效应，这些条件极大限制了该技术效率的提升和应用的范畴。1962 年，Armstrong^[8]等人首次提出了准相位匹配（Quasi-Phase Matching, QPM）的概念，即利用相位反转的方法周期性调制非线性光学材料的极化率，从而人为引入一“倒格矢”补偿相位失配，这种技术可以大大提高非线性光学频率变换的转换效率，并且理论上只要设计出合适的极化反转周期，就能够在光学材料透光波段范围内实现任意频率变换。准相位匹配鲜明的技术特点自一出现就备受瞩目，但在研究初期，由于材料制作工艺的不成熟，一直难以制备出精度较高的准相位匹配光学材料，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

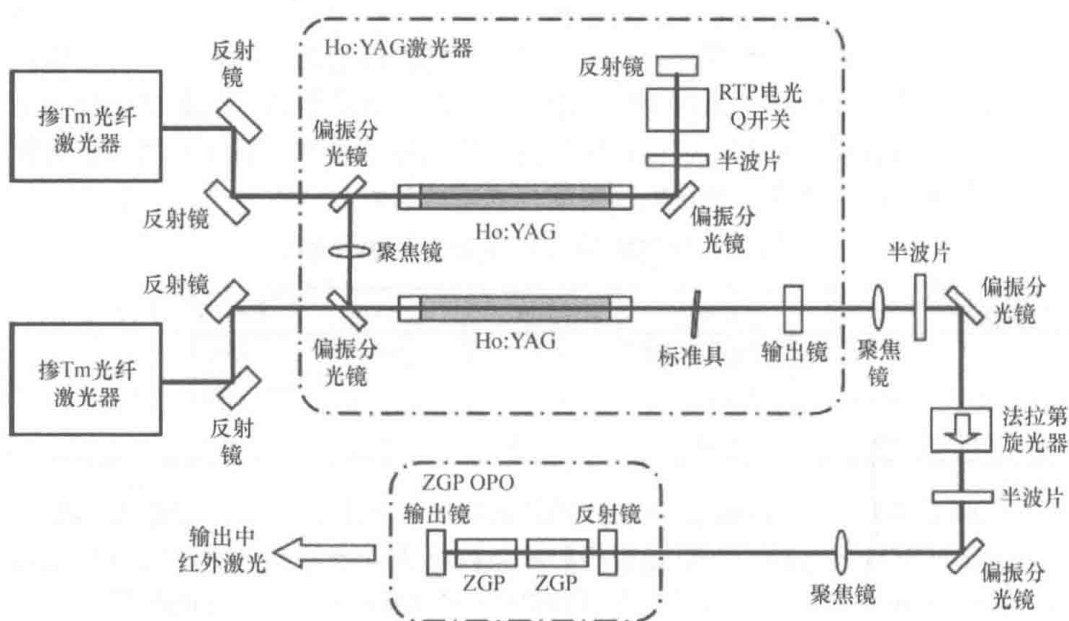


图 1.1 高平均功率 ZGP-OPO 装置示意图

论阶段，无法得到实际的应用。进入 20 世纪 90 年代后，随着掩膜、光刻、极化反转等一系列制作工艺的逐步完善，以铌酸锂(LN, LiNbO_3)、钽酸锂(LT, LiTaO_3)等介电体光学超晶格材料的制备成功为标志，准相位匹配技术的研究得到了飞速发展，尤其在基于该技术的光学参量振荡器研究方面，更是将宽相位匹配区间、每个工作点都能够实现非临界相位匹配以及变频方式简单多样等技术优势发挥的淋漓尽致，已成为近年来全固态光学参量振荡器的主导研究方向。常用的具有代表性的超晶格材料如表 1-1 所示，其中，1064nm 激光泵浦的 MgO:PPLN-OPO 、 MgO:PPLT-OPO 通过合理的极化周期设计和温度控制，同样能够获得高效率中红外波段激光输出^[9-12]，相比较 ZGP-OPO，前端泵浦光源的技术成熟度要明显占优，并且通过优化腔型，能够实现连续运转，对于小功率中红外激光器的普及化起到了积极推动作用。除此以外，适用于短波长激光泵浦的 PPKTP 和同族的 PPKTA、PPRTA 以及可工作于远红外波段的 OPGaAs 等一批新型超晶格材料的研究也均取得了突破性进展，使得 0.8~11.5 μm 整个近、中、远红外光谱区都能够应用准相位匹配技术实现变频参量光调谐。

准相位匹配技术的普及应用极大地推动了光学参量振荡器的研究进展，随着研究的深入与细化，单一的光参量变频不再是唯一的研究方向，通过与其他多种非线性效应相结合实现器件功能上的高度集成化^[13-17]、参量振荡过程的同

步差频放大^[18-20]等多物理场联合作用方面的研究日益引起国际光学界关注，相关的报道都颇具技术前瞻性。同时，与准相位匹配技术相辅相成的超晶格材料也不仅仅局限于常规形态，极化结构已由一维平面推广至二维空间^[21-23]，周期分布也已由传统单周期线性排列拓展至准周期、非周期等复杂分布形式^[24-31]，这些变化促使多光参量耦合过程成为可能。综上所述，如何充分利用超晶格材料结构设计上自由度可灵活把控的突出特点，探索结构变化所带来的全新物理规律，继续拓宽准相位匹配技术的应用范畴，将是未来基于准相位匹配技术光学参量振荡器的重点研究课题。

1.1.2 多光参量振荡器概念

传统意义上准相位匹配光学参量振荡器（QPM-OPO）的工作原理是利用超晶格材料的混频特性将一个泵浦光子同时转换为一个信号光子和一个闲频光子，形成一对参量光振荡及输出，但这对参量光通常不能同时存在于一个光谱区域。如利用 1064nm 激光泵浦参量光振荡腔中 MgO:PPLN 或 MgO:PPLT 晶体时，图 1.2 为不同温度和极化周期条件下模拟得到的参量光理论调谐曲线，根据美国实验和材料检测协会对近红外（700~2526nm）与中红外（3000~6000nm）波段的定义，1064nm 的泵浦光子同时转换为一个近红外光子（信号光）和一个中红外光子（闲频光），此时该 OPO 在这两个光谱覆盖区域只能获得相应光谱区域内的一个波长激光输出^[32-46]。

根据图 1.2 所示的 MgO:PPLN 理论调谐曲线，在室温条件下，1064nm 激光泵浦极化周期 29.5 μm 的 MgO:PPLN，将得到波长 1.47 μm 信号光和与之唯一对应的 3.8 μm 闲频光，当把极化周期调整到 30.5 μm ，与之联动的信号光与闲频光输出波长分别变为 1.57 μm 和 3.3 μm ，此时若需要同谱区 1.47 μm 、1.57 μm 双波长信号光或 3.3 μm 、3.8 μm 双波长闲频光输出，又或者 1.57 μm 、3.8 μm 这种跨周期参量光同时输出，受动量、能量守恒条件限制，在常规 QPM-OPO 以及单周期超晶格材料中是无法实现的。解决类似问题的前提需要改变 QPM-OPO 固有的参量光运转体制，使得所需参量光尽管为不同的极化周期所对应，依然均能在腔内获得足够的增益。按照这种思路，如果把传统 QPM-OPO 单对参量光子振荡的形式拓展到多对参量光子在腔中同时形成振荡，即多光参量振荡器（Multi Optical Parametric Oscillator, MOPO），可以依据需求在腔内背景噪声中同时建立起两对及以上的参量光，如图 1.3 所示，这种运转体制不失为获得同谱区以及跨周期多波长可调谐激光的有效途径。

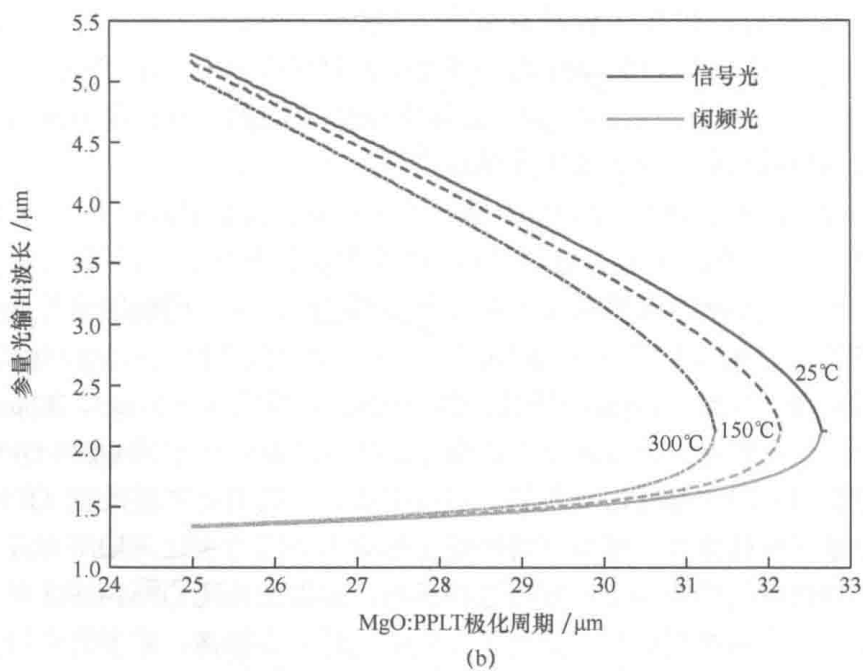
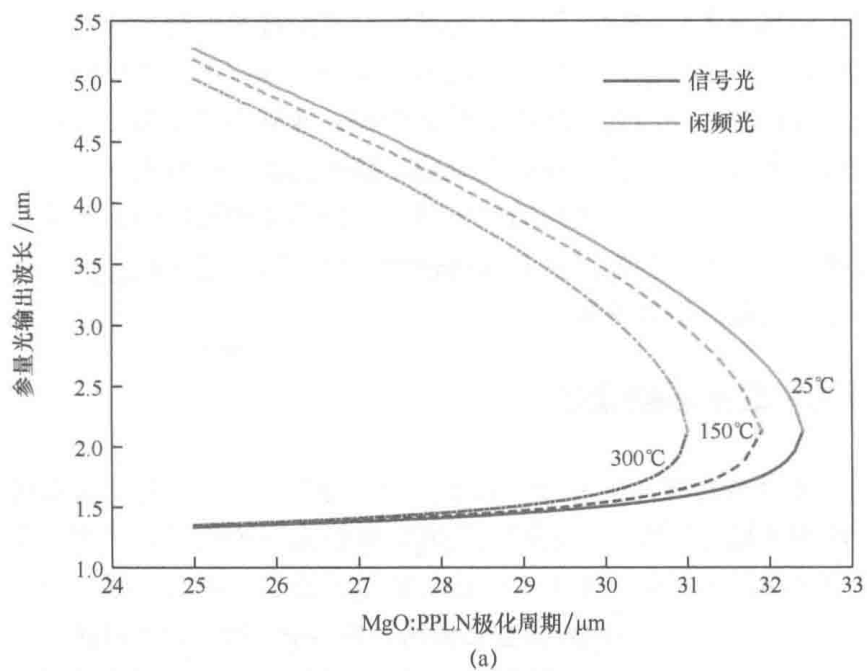


图 1.2 1064nm 激光泵浦 MgO:PPLN、MgO:PPLT 的理论调谐曲线

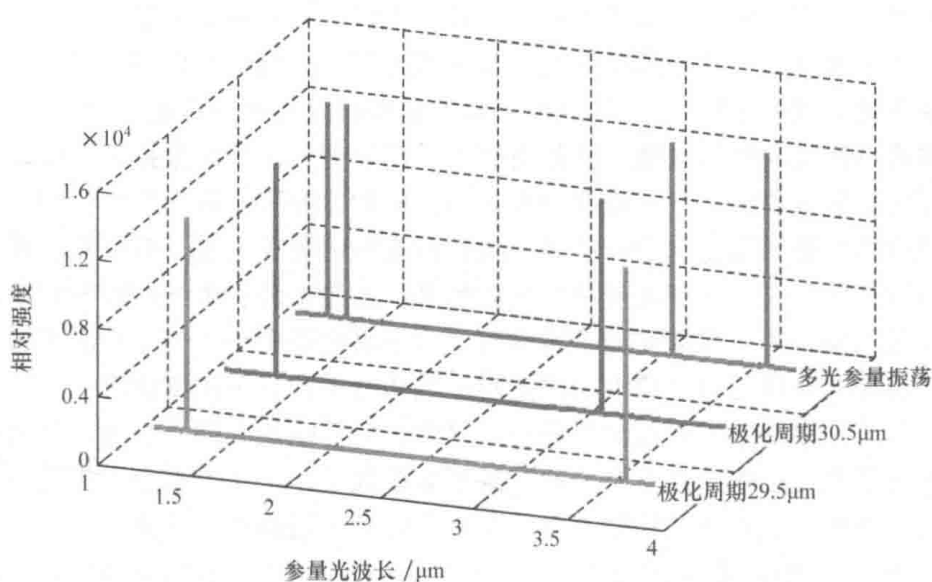


图 1.3 传统 QPM-OPO 与 MOPO 输出光谱对比示意图

1.1.3 多光参量振荡器研究意义

随着科技水平的进步，常规同谱区单波长可调谐的 QPM-OPO 已难于满足一些前沿技术科学研究的需求，如利用光学非线性差频效应产生宽谱带可调谐的太赫兹 (THz) 辐射波，由于 THz 频段处于宏观电子学向微观光子学过渡区间，大量有机分子转动和振动跃迁、半导体的子带和微带能量以及大量星际分子的特征谱线等都在这个范围内，因此 THz 的研究对于物理学、材料学、生命科学、天文学、国防信息科学等学科前沿领域的发展具有重要科学价值，其中 THz 辐射波的获取是开展 THz 科学研究的关键。目前针对 THz 辐射波光学产生方法的研究已被广泛开展，但由于同谱区双波长差频光源输出波段的单一，使得对 THz 辐射波不同谱带特性的研究仍处于薄弱环节，这在一定程度上制约了 THz 辐射波的进一步深入应用。

再如军事方面，在近年来的各种局域战争中，随着制导技术的发展，利用 1.06μm、1.57μm 短波红外激光作为目标指示，结合 3.7μm 以上中红外激光凝视成像的多波段复合制导武器在实战中被广泛使用，能够对抗该类武器实现反精确打击的激光干扰系统由于多波段可调谐激光器件的匮乏，通常只能针对各个谱段采用多种激光器组合的方式，结构复杂、同步难度极大，使得干扰对抗效能大打折扣。

民用方面，环境污染物质监测一直是社会热议话题，差分吸收激光雷达是

检测大气中有害气体成分及含量的常用技术手段，具有探测灵敏度高、受大气目标干扰小等优点，其原理是利用多波长激光束与大气相互作用，当其中某个波长激光被大气中某特定分子吸收，吸收的强弱程度与该分子的含量密切相关，这时接收端所反映的回波激光能量将会发生明显变化，从而根据不同波长激光能量变化精确推测出大气组成成分及含量。影响差分吸收激光雷达探测范畴和探测精度的主要因素有两个：一是多波长激光频谱覆盖区域，频谱覆盖越广，所能够探测的环境中微观物质种类也就越多；二是多波长激光的波长间隔，较小的波长间隔使得一束激光处于被测气体分子吸收带中心，另一束激光刚好在吸收区边缘，这样可以更精准的确定对应气体分子和分子浓度比例。

民用方面激光除用作探测光源外，以激光为传输媒介的光纤通信技术已经成为现代信息社会的主要支柱产业，毫不夸张地说，维系着整个人类的信息交互和高速运转。能够有效抑制“电子瓶颈”的全光网络是光纤通信未来的必然发展趋势，其中，密集波分复用（Dense wavelength Division Multiplexing, DWDM）系统的性能优劣是实现全光网络的关键，这个系统能把单根光纤的传输容量提高数倍。虽然采用多路单波长激光器是构建多信道 DWDM 系统最直接的光源方案，但是仅仅通过激光器数量的简单叠加来满足多信道需求，不单单会增加系统结构复杂性和成本，还将对系统整体稳定性造成很大影响，这些都不利于光纤网络器件大范围覆盖和高批量生产。因此，一种性能稳定、结构简单、波长选定方便快捷与光纤能够很好兼容的多波长激光器的研发已成为全光网络体系建设中的重要环节，具有广阔的应用需求。

综上所述，多波长可调谐激光的获取和光源器件的有效集成化是制约上述前沿科学研究及应用的主要问题，准相位匹配多光参量振荡器的研究指向恰恰与该方面的技术需求相吻合，并且所用超晶格材料结构设计上的灵活性将会极大拓宽解决相关物理问题的研究思路，因此，开展该方面研究对于突破传统光学参量振荡器波长局限、推进多光参量振荡器的普及应用、探索全新多光参量运转体制具有重要学术价值和科学意义。

1.2 准相位匹配光学参量振荡器研究概况

20 世纪 90 年代初，介电体超晶格材料的广泛应用促使准相位匹配光学参量振荡器得到迅速发展，为了满足不同的应用需求，人们就不同的参量光输出波段和指标侧重点开展了深入研究，最终获得的高性能参量光从运转方式上主要区分为连续和脉冲两种，下面针对这两种运转方式的国内外研究情况进行简要概述。

1.2.1 连续运转的 QPM-OPO 国内外研究现状

由于相对较低的腔内增益,连续(Continuous-Wave, CW)激光泵浦的 OPO 实现起来要比脉冲泵浦困难得多。在介电体超晶格材料未得到广泛应用之前,由于缺乏高效率的非线性光参量变频介质, CW-OPO 一直发展较为缓慢,直到超晶格材料制备工艺成熟之后,才使得 CW-OPO 有了重要的突破。

1996 年,美国光波公司的 W.R.Bosenberg 与斯坦福大学的 L.E.Myers 等人采用两种不同的单谐振(Singly Resonant Optical Parametric Oscillator, SRO)环形腔,在 13.5W 的 $1.064\mu\text{m}$ 激光连续泵浦 PPLN(PPLN 晶体尺寸为 $0.5\text{mm}\times 15\text{mm}\times 50\text{mm}$,极化周期为 $29.75\mu\text{m}$)条件下,实现了 3.55W 的 $3.25\mu\text{m}$ 中红外闲频光输出,量子效率达到了 86%^[47]。该实验所使用的环形行波腔结构具有相对强度噪声低、阈值低、易于引入标准具实现稳频等优点,同时能克服驻波腔出现的空间烧孔效应,有利于单纵模激光产生,是一种典型提高 CW 参量光转换效率的技术途径。2011 年,西班牙 Ciencies Fotoniques 研究所的 S.Chaitanya Kumar 等人采用输出波长 1064nm 的单频掺 Yb 光纤激光器作为泵浦源,外腔泵浦 MgO:PPLN(MgO:PPLN 晶体长度为 50mm,厚度为 1mm,极化周期为 $29.5\sim 31.5\mu\text{m}$),OPO 腔为单谐振 8 字环形腔,实验装置如图 1.4 所示,通过对信号光输出耦合镜透过率的优化,在注入功率 30W 条件下实现了 17.5W 混合光输出,其中单信号光输出为 9.8W,光束质量 $M^2<1.28$,闲频光输出为 7.7W,光束质量 $M^2<1.37$,通过改变晶体畴周期与晶体温度,实现了信号光波长最大调谐范围 393nm,闲频光波长最大调谐范围 120nm,这是现有报道的 CW-QPM-OPO 最高输出功率^[48]。

在这方面,国内仅有山西大学针对此做了深入研究,2009 年,山西大学光电研究所的张宽收课题组采用 25W 的 808nm 光纤模块泵浦四镜环形腔中的 Nd:YVO₄,产生 $1.064\mu\text{m}$ 单频激光继续泵浦单谐振环形 OPO 中的 PPLN(PPLN 晶体尺寸为 $1\text{mm}\times 10\text{mm}\times 30\text{mm}$,极化周期为 $29.8\mu\text{m}$),晶体温度在 $130\sim 170^\circ\text{C}$ 变化时,获得信号光波长 $1.57\sim 1.59\mu\text{m}$ 可调谐输出,其中单频 $1.57\mu\text{m}$ 输出功率为 310mW^[49],与国外相比,在输出指标方面还有很大差距。

除采用环形参量振荡腔外,V 形内腔单谐振的 QPM-OPO 方案也被广泛研究。早于 1998 年,英国圣安德鲁斯大学的 Stothard 等人将 PPLN 引入到内腔 CW-SRO 中,利用 1W 的半导体激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 及 PPLN 内腔 SRO(PPLN 晶体尺寸为 $0.5\text{mm}\times 11\text{mm}\times 50\text{mm}$,极化周期为 $28.5\sim 29.9\mu\text{m}$),获得了 70mW 的 $3.66\mu\text{m}$ 中红外激光,阈值仅为 310mW,并实现了信号光波长在 $1.45\sim 1.60\mu\text{m}$ 、闲频光波长在 $3.16\sim 4.02\mu\text{m}$ 范围内的宽调谐^[50]。这种腔