

中国激光

光学超晶格中红外光参量振荡器研究进展

聂鸿坤¹, 宁建², 张百涛^{1*}, 杨克建¹, 赵刚², 吕新杰², 何京良¹

¹山东大学新一代半导体材料研究院晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100;

²南京大学固体微结构物理国家重点实验室, 江苏 南京 210093

摘要 基于光学超晶格的光参量振荡技术是研制 2~5 μm 波段中红外相干光源的有效技术手段, 在遥感探测、精密测量、环境监测、医疗诊断、科学研究和军事国防等领域具有非常重要的应用价值。总结了光学超晶格 2~5 μm 中红外光参量振荡器的国内外研究进展, 重点分析了连续波、纳秒脉冲以及皮秒脉冲等不同运转模式下光参量振荡器的结构特点、优势和发展前景。并对光学超晶格中红外光参量振荡器的发展趋势进行了展望, 指出高功率、宽调谐、低功耗、小型化和轻量化是光学超晶格光参量振荡器的重要发展方向, 而高质量大尺寸(厚度)的光学超晶格晶体、性能优异的泵浦源和可靠的工程化样机设计是未来光参量振荡器发展的核心技术。

关键词 激光光学; 光学超晶格晶体; 光参量振荡器; 中红外激光

中图分类号 O437.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0501008

1 引言

2~5 μm 中红外激光在遥感探测、大气环境监测、医疗诊断、精密测量以及光电对抗等领域中具有广阔的应用前景和不可替代的重要作用^[1-7]。3~5 μm 中红外波段被称为“大气窗口区”, 是大气透过率最高的传输窗口, 在大雾、烟尘等中的穿透能力强, 被广泛应用于自由空间光通信领域^[8]。军事上红外制导导弹探测器的光谱响应范围在 2~5 μm 波段, 随着红外探测器应用量的逐年增加, 相应的干扰技术也在加速开发, 针对红外导引头的光电对抗技术迫切需要该波段的激光光源^[9]。2 μm 和 3 μm 附近的中红外激光位于水分子强吸收带内, 在人体组织中的穿透深度浅, 对周围组织的热损伤小, 对组织具有较高的消融、切除和汽化能力; 2 μm 激光本身具有止血能力, 被广泛应用于生物医疗领域; 2~3 μm 中红外激光还广泛应用于工业加工、激光雷达等领域。2~5 μm 波段同时被称为“分子指纹区”, 大量气体分子的吸收谱线位于该波段内, 该波段激光在大气污染监测、微量气体探测、精密光谱分析和分子生物医疗等领域具有非常重要的应用价值^[10]。

此外, 2~5 μm 超强超短中红外激光可以产生高次谐波, 进而实现高亮度、高对比度的阿秒光脉冲和中红外频率梳, 也可作为光参量振荡器(OPO)泵浦源产生 6~8 μm 甚至更长波长的中红外激光^[11]。因此, 2~5 μm 中红外激光一直都是全固态激光领域的研究热点。

目前, 2~5 μm 全固态中红外激光器从产生机理上大致可以分为两类: 一类是基于激光增益介质的受激辐射, 主要包括半导体激光器、过渡金属或稀土离子掺杂的固体或光纤激光器等^[12-19]; 另一类是基于非线性频率变换技术, 主要包括中红外拉曼激光器、中红外超连续谱激光器、中红外差频激光器和中红外 OPO 等^[20-30]。与其他技术方案相比, OPO 具有输出功率高、转换效率高、光束质量好、调谐范围宽以及可实现多种运转方式(连续波、纳秒脉冲、皮秒脉冲甚至飞秒脉冲)等优点。特别是随着近年来近红外全固态激光技术(尤其是光纤激光器)的迅猛发展和大尺寸、高质量非线性光学晶体材料制备工艺技术的日益完备, OPO 成为当前制备 2~5 μm 中红外激光光源最有效的技术手段。

用于中红外 OPO 的非线性光学晶体材料主要

收稿日期: 2020-11-03; 修回日期: 2020-11-30; 录用日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405204)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ030127)

*E-mail: btzhang@sdu.edu.cn

包括本征体块晶体和周期极化的光学超晶格两类。本征体块晶体主要包括磷酸钛氧钾 (KTiOPO₄, KTP)、砷酸钛氧钾 (KTiOAsO₄, KTA)、磷锆锌 (ZnGeP₂, ZGP)、硫镓银 (AgGaS₂) 和硒镓银 (AgGaSe₂) 等^[31-39], 晶体的主要特性如表 1 所示。其中, KTP 和 KTA 晶体具有较大的有效非线性系数, 但是它们在 3.5 μm 以上波段具有较大的吸收率, 这限制了其在 3.5~5.0 μm 波段中红外激光中的应用。ZGP、AgGaS₂ 和 AgGaSe₂ 晶体具有较大的非线性系数和较大的热导率等, 目前已经实现了

高功率 3~5 μm 甚至 6~10 μm 中红外 OPO 输出, 但是 ZGP 晶体在 2 μm 以下波段不透光, 不能被目前最成熟的 1 μm 近红外激光泵浦。周期极化的光学超晶格晶体主要包括周期极化铌酸锂 (PPLN)、周期极化钽酸锂 (PPSLT) 和周期极化 KTP (PPKTP) 等。光学超晶格晶体具有非线性系数大、调谐范围宽、波长调谐方式多和结构紧凑等优点, 将其应用到中红外 OPO 中, 可实现宽调谐、窄线宽和高功率的中红外激光输出, 是制备 2~5 μm 中红外 OPO 的最佳选择。

表 1 常用的中红外 OPO 非线性光学材料特性

Table 1 Characteristics of commonly mid-infrared OPO nonlinear optical materials

Parametric crystal	Transmittance range / μm	Effective nonlinear coefficient / (pm · V ⁻¹)	Thermal conductivity / [W · (k · m) ⁻¹]	Damage threshold @ pulse width of 10 ns / (GW · cm ⁻²)	Ref.
KTiOPO ₄ (KTP)	0.35-4.50	16.9	0.4	0.5@ wavelength of 1.06 μm	[31]
KTiOAsO ₄ (KTA)	0.35-5.30	3.2	—	1.2@ wavelength of 1.06 μm	[32-33]
ZnGeP ₂ (ZGP)	0.7-12.0	75.0	36.0	0.1@ wavelength of 2.1 μm	[34-36]
AgGaS ₂	0.5-13.0	13.4	1.4	0.04@ wavelength of 1.06 μm	[37, 39]
AgGaSe ₂	0.71-12.0	43.0	1.0	0.04@ wavelength of 1.06 μm	[38-39]
BaGa ₄ S ₇ (BGS)	0.35-13.7	12.6	—	1.2@ wavelength of 1.06 μm	[40-41]
BaGa ₄ Se ₇ (BGSe)	0.47-18	24.3	0.74	0.1@ wavelength of 1.06 μm and 0.12@ wavelength of 2.1 μm	[42-43]
LiInS ₂ (LIS)	0.35-12.5	15.8	8.5	1@ wavelength of 1.06 μm and 6@ wavelength of 5 μm	[43-44]
LiInSe ₂ (LISE)	0.47-13.7	16	5	0.04@ wavelength of 1.06 μm	[45-46]
LiGaSe ₂ (LGS)	0.32-11.6	5.8	6-8	0.24@ wavelength of 1.06 μm	[47]
AgGaGeS	0.5-11.5	15	0.4	0.05@ wavelength of 1.06 μm	[47]
PPLN	0.33-5.5	16	5	0.3@ wavelength of 1.06 μm	[28, 30]
PPLT	0.28-4.5	9	—	0.58@ wavelength of 1.06 μm	[28, 30]
PPKTP	0.35-4.5	9.8	—	1@ wavelength of 1.06 μm	[48]

本文简要介绍了 OPO 和准相位匹配技术原理, 对基于光学超晶格的 2~5 μm 中红外 OPO 的国内外研究进展进行了总结, 重点分析了连续波、纳

秒脉冲和皮秒脉冲运转模式下光学超晶格中红外 OPO 的实现方式和结构特点, 最后对光学超晶格中红外 OPO 的发展趋势进行了展望。

2 OPO 和准相位匹配技术

OPO 技术利用晶体的二阶非线性光学效应实现激光频率下转换,包括泵浦源、非线性参量晶体和谐振腔三部分。在满足相位匹配条件下,可以实现“任意”波长的参量光输出,并且入射的泵浦光能量均以光辐射(信号光和闲频光)的形式发射,没有废热产生。准相位匹配技术通过周期性地改变非线性晶体极化率值的符号来实现非线性效应的增强,它克服了双折射相位匹配技术空间走离效应导致的非线性作用长度有限、一般不能利用非线性晶体最大的有效非线性系数以及特定波长变换需对应晶体特定匹配角度等缺陷。

2.1 OPO 的基本原理

根据初始和反馈条件不同,光参量效应可分为光参量发生(OPG)、光参量放大(OPA)和光参量振荡,三种作用示意图如图 1 所示。当频率为 ω_p 的强高频光(泵浦光)入射到非线性晶体时,由于二阶非线性光学效应,会产生信号光(ω_s)和闲频光(ω_i)两

束新的光波, ω_s 和 ω_i 满足 $\omega_i + \omega_s = \omega_p$,该过程称为 OPG,相应的器件称为光参量发生器。当 ω_p 和较弱的 ω_s 同时入射到非线性晶体中时, ω_s 被放大,同时会产生另外一个频率为 $\omega_i = \omega_p - \omega_s$ 的闲频光,该过程称为 OPA,相应的器件称为光参量放大器。如果将非线性晶体放置于光学谐振腔中,输入较强的泵浦光,谐振腔使新产生的 ω_s 和 ω_i 在腔内不断往返通过非线性晶体,从而实现持续参量放大输出,该装置称为 OPO。按照谐振腔内谐振频率的数目,可分为单谐振 OPO 与双谐振 OPO。其中,单谐振具有良好的光谱和功率稳定性,但是振荡阈值较高;而双谐振可以有效降低泵浦阈值,但是由于要同时满足信号光和闲频光振荡,稳定性较差,并且在高功率条件下易发生参量逆转换。此外,根据 OPO 与泵浦源的关系,还可分为内腔 OPO、外腔 OPO 和复合腔。按照腔型结构,OPO 谐振腔又包括线形直腔、L 型腔和 X 型腔等,实验中要根据 OPO 的运转模式(连续波、纳秒波、皮秒波等)合理设计和优化腔型结构。

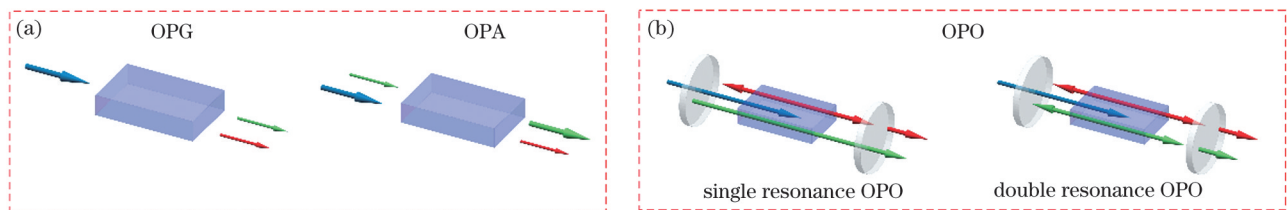


图 1 光参量效应示意图。(a) OPG 和 OPA;(b) OPO

Fig. 1 Schematic of optical parametric effects. (a) OPG and OPA; (b) OPO

2.2 准相位匹配技术

为了克服折射率相位匹配的局限性,Armstrong 等^[49]于 1962 年提出了准相位匹配(QPM)概念,即采用某种特定手段对非线性晶体的二阶极化率进行周期性调制以补偿光波相互作用过程产生的相位失配,最终实现高效率非线性频率变换。如果不考虑相位匹配,当入射强激光束在晶体中传播了一个相干长度 L_c 时,相互作用的光波之间会产生 π 的相位差,然后能流方向将会发生逆转,如图 2(a)所示。每经过一个相干长度,能量从泵浦光流向参量光,或者从参量光流向泵浦光,如此反复。但如果在一个相干长度之后引入一个额外的相位差 π ,相互作用的光波重新变成同相位,从而使能流仍保持从泵浦光向参量光单向流动,如图 2(b)所示。额外相位差 π 的引入就是通过调制非线性晶体的非线性极化率的符号来实现的。从倒空间的角度

分析,根据傅里叶变换,非线性极化系数呈周期变化的材料在空间频率域内对应一个倒格矢 \mathbf{k}_m ,该倒格矢恰好弥补了频率变换过程中的波矢失配,即 $\Delta \mathbf{k} = \mathbf{k}_p - \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i = \mathbf{k}_m$,其中 $\Delta \mathbf{k}$ 为相位失配因子, \mathbf{k}_p 为泵浦光波矢量, \mathbf{k}_s 为信号光波矢量, \mathbf{k}_i 为闲频光波矢量。准相位匹配可以通过改变超晶格材料的畴周期来适应不同的工作波长,同时可以利用晶体的最大非线性系数。由于不存在 o 光和 e 光的走离,可以采用尽可能长的晶体。如果极化周期可以与光的波长比拟,则周期极化后的晶体通常称为“光学超晶格”^[26]。以 LiNbO_3 晶体为例,外电场周期极化后,其电畴极化微观结构如图 2(b)所示^[50]。此外,通过精心设计周期结构,采用准周期极化或非周期极化,可以利用一块晶体同时实现两个甚至多个非线性过程,大大降低激光频率变换器件的体积和复杂程度。

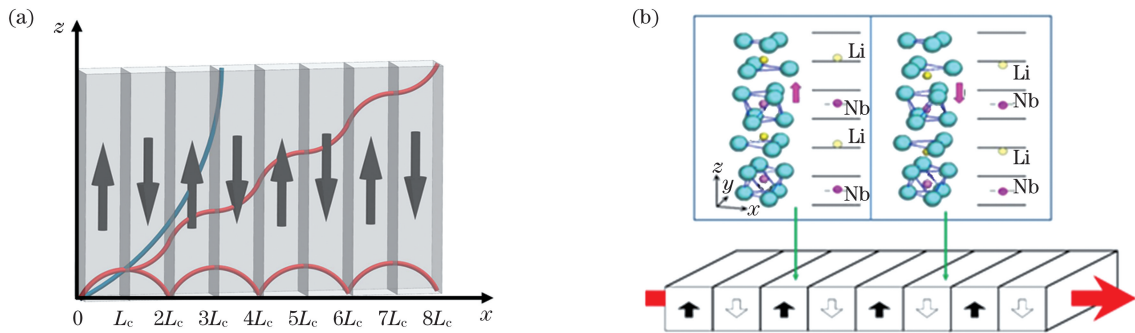


图 2 QPM 过程。(a) 光学超晶格中非线性频率变换光强度随相互作用长度的变化；(b) 外电场周期极化后铌酸锂电畴的极化方向示意图

Fig. 2 Process of QPM. (a) Intensity of nonlinear frequency conversion light in optical superlattices versus interaction length; (b) schematic of polarization direction of lithium niobate domain after periodic polarization in external electric field

3 基于光学超晶格晶体的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外 OPO 的研究进展

激光产生后不久, OPO 的概念和理论模型在 1963 年由 Korll^[51] 提出, 随后 Giordmaine 等^[52] 于 1965 年首次在实验上进行了验证。之后由于缺乏高性能激光泵浦源特别是高质量非线性晶体, OPO 的发展相对比较缓慢。直到 20 世纪 80 年代中后期, 以 KTP、 LiB_3O_5 (LBO) 和 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (BBO) 等为代表的一大批优质非线性光学晶体的出现为 OPO 的快速发展奠定了坚实的基础。Yamada 等^[53] 于 1993 年通过外加电场极化的方法首次制备了周期极化的 LiNbO_3 晶体; Myers 等^[54] 于 1995 年在室温下对样品进行外加电场极化, 大大降低了周期极化晶体的难度和成本, 提高了周期极化晶体的质量和尺寸, 并首次实现了基于 QPM 的单谐振 OPO 有效运转, 获得了 $1.66 \sim 2.95 \mu\text{m}$ 的调谐激光输出, 极大地推动了非线性频率变换技术特别是 OPO 的发展。至此, 基于光学超晶格晶体的 OPO 开始登上历史舞台并大放异彩。OPO 参量光输出模式与泵浦光的工作模式相近, 输出模式涵盖连续波到超短脉宽。本文主要介绍了连续波、纳秒脉冲和皮秒脉冲三种工作模式下基于光学超晶格晶体的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外 OPO 的研究进展。

3.1 基于光学超晶格晶体的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 连续波中红外 OPO 的研究进展

$2 \sim 5 \mu\text{m}$ 连续波可调谐中红外激光在精密光谱分析、光学传感与探测、气体监测、自由空间光通信以及光电对抗等领域具有重用的应用价值。利用准相位匹配技术, 泵浦光和参量光在整个晶体长度内都可以进行有效的参量耦合, 晶体的最大有效非线性

系数和长度可得到最大化利用。因此, 与其他本征非线性光学晶体相比, 基于光学超晶格的连续波 OPO 可以有效降低连续波 OPO 的振荡阈值, 提高参量光的转化效率和输出功率, 并可以通过改变周期和晶体温度来实现宽波段波长调谐, 是产生 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 连续波中红外激光的主要技术手段。

表 2 列出了近年来基于光学超晶格的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 连续波中红外 OPO 的主要进展及性能参数。为了保证输出功率和频率的稳定性, 连续波 OPO 通常采用单谐振结构, 主要是内腔单谐振和泵浦增强单谐振结构, 泵浦源主要是传统的半导体激光泵浦的全固态激光器、半导体激光器 (LD) 和光纤激光器。1996 年, Bosenberg 等^[55] 利用 1064 nm 连续波 Nd: YAG 激光器泵浦 PPLN 晶体, 采用单谐振直腔结构首次实现了基于光学超晶格晶体的连续波 OPO 运转, 闲频光的调谐范围为 $3.11 \sim 3.98 \mu\text{m}$, 在 $3.3 \mu\text{m}$ 处的输出功率大于 1.2 W ; 同年, 他们又采用单谐振环形腔结构实现了近衍射极限的光子转换效率为 86% 的 $3.25 \mu\text{m}$ 闲频光输出 (3.5 W)^[56]。1998 年, Stothard 等^[57] 采用内腔单谐振复合腔结构 [如图 3(a) 所示], 获得了 70 mW 的 $3.66 \mu\text{m}$ 中红外激光输出, 功率输出曲线如图 3(b) 所示; 2003 年, 他们比较了 PPLN 和周期极化 RTA (PPRTA) 内腔单谐振 OPO 的输出特性, 指出受 PPLN 晶体热透镜效应的影响, 采用 PPRTA 时 OPO 输出光束质量、功率和频率稳定性要优于 PPLN^[58]。2008 年, Ding 等^[59] 利用连续波 Nd: YVO₄ 激光器内腔泵浦 $28.5 \mu\text{m}$ 的 PPLN 晶体, 实现了 155 mW 的 $3.86 \mu\text{m}$ 连续波中红外激光输出。2010 年, Yan 等^[60] 同样采用连续波 Nd: YVO₄ 激光器内腔泵浦 PPLN 晶体, 利用单谐振复合腔结构

表 2 基于光学超晶格晶体的 2~5 μm 连续波中红外 OPO 的主要进展及性能参数
Table 2 Main progress and performance parameters of 2~5 μm CW mid-infrared OPOs based on optical superlattice crystals

Laser style	Pump source		OPO oscillation threshold / W	Nonlinear crystal	Period / μm	Length / mm	Cavity	Mid-infrared wavelength tuning range / μm	Mid-infrared output power	Ref.
	Output power / W	Wavelength / nm								
Nd : YAG laser	17	1064	2.2	PPLN	29.75	50	Two-mirror straight cavity	3.11–3.98	1.2 W@3.3 μm	[55]
Nd : YAG laser	13.5	1064	2.2	PPLN	29.75	50	Four-mirror ring cavity	3.24–3.95	3.55 W@3.3 μm	[56]
Nd : YVO ₄ laser	—	1064	—	PPLN	28.5–29.9	50	Three-mirror folded cavity	3.16–4.02	70 mW@3.66 μm	[57]
Nd : YVO ₄ laser	15	1064	—	PPRTA	39.6	20	Four-mirror folded cavity	3.404–3.538	>440 mW@3.404–3.538 μm	[58]
Nd : YVO ₄ laser	—	1064	—	PPLN	26–29	24	Three-mirror folded cavity	3.83–3.91	155 mW@3.86 μm	[59]
Nd : YVO ₄ laser	—	1064	—	PPLN	29.0–31.5	40	Straight cavity	3.19–4.00	1.9 W@3.19 μm	[60]
Nd : YVO ₄ laser	8.75	1064	—	PPLN	31	40	Two-mirror straight cavity	3.13–4.20	905 mW@3.2 μm	[61]
AlGaAs SMF laser	0.062	810	1×10 ⁻³	PPLN	21.0–22.4	50	Two-mirror straight cavity	2.58–3.44	4 mW@2.58–3.44 μm	[62]
InGaAs laser	2.5	925	4×10 ⁻³	PPLN	26.0–26.6	38	Four-mirror ring cavity	2.03–2.29	480 mW@2.1 μm	[63]
VECSEL LD laser	—	1040–1063	—	PPRTA	29.5–32.8	30	V-shaped cavity	—	205 mW	[64]
LD	8.05	1062	—	PPLN	30.5	50	Four-mirror ring cavity	3.15–3.41	1.1 W@3.37 μm	[65]
Yb fiber laser	8.3	1031–1100	3	PPLN	29.25–30.00	40	Four-mirror ring cavity	2.98–3.70	1.9 W@3.2 μm	[66]
Nd : YAG laser	10	1064	5×10 ⁻⁶	PPLN	29.3–30.1	50	Four-mirror ring cavity	3.0–3.8	1.5 W@3.3 μm	[67]
Yb fiber laser	6.6	1057–1100	30–100	PPLN	29.75	40	Four-mirror ring cavity	3.132–3.569	1.13 W@3.2 μm	[68]
Yb : YAG laser	18	1024–1036	5×10 ⁻³	PPLN	28.5–29.9	—	Four-mirror ring cavity	3.00–4.85	3 W@2.95 μm, 1.5 W@3.8 μm and 90 mW@4.16 μm	[69]
Yb fiber laser	50	1070	471	PPLN	31.5	50	Four-mirror ring cavity	—	10 W@2.94 μm	[70]
Fiber laser	2.8	1083	50×10 ⁻³	PPLN	31.3–32.5	80	Four-mirror ring cavity	2.65–3.20	750 mW@2.7 μm	[71]
Yb fiber laser	20	1064	140	PPLN	28.5–31.5	50	Two-mirror straight cavity and four-mirror X-type cavity	2.70–3.45	~1 W@3.13 μm and ~3 W@3.13 μm	[72]
Yb fiber laser	21.5	1064	—	PPLN	30.5–31.5	50	Four-mirror X-type cavity	2.70–3.45	1 W	[73]

续表

Laser style	Pump source		OPO		Nonlinear crystal	Period / μm	Length / mm	Cavity	Mid-infrared wavelength tuning range / μm	Mid-infrared output power	Ref.
	Output power / W	Wavelength / nm	Linewidth / GHz	oscillation threshold / W							
Yb fiber laser	40	1064	477	7	PPLN	28.5–31.5	50	Four-mirror ring cavity	2.9–4.1	7.54 W@3.03 μm and 1.04 W@4.05 μm	[74]
Nd : YAG laser	150	1064	—	—	PPLN	29.2	45	Two-mirror straight cavity	3.7–3.9	22.6 W@3.86 μm	[75]
Yb fiber laser	30	1064	150	—	PPLN	29.9	50	Four-mirror ring cavity	2360–3600	6.2 W@3.6 μm	[76]
Single frequency fiber laser	30	1060	89×10^{-3}	10	PPLN	29.5–31.5	50	Four-mirror ring cavity	2.78–3.10	7.7 W@3.07 μm	[77]
Yb fiber laser	50	1064.7	476	—	PPLN	31.0–29.5	50	Four-mirror straight cavity and four-mirror ring cavity	3.004–4.050	10.2 W@3.004 μm and 4.9 W@3.87 μm	[78]
Yb fiber laser	30	1064	—	—	PPSLT	30.65 and 30.15	30	Four-mirror ring cavity	3.032–3.462	5.5 W@3221 nm	[79]
Yb fiber laser	30	1064	89×10^{-3}	—	PPLN	31.5	50	Standing wave cavity	2.35–2.95	4.09 W@2.83 μm	[80]
Yb fiber laser	25	1064	265	—	PPLN	30.7	—	Four-mirror ring cavity	—	0.2 W@3.3 μm	[81]
Yb fiber laser	49	1064	—	—	PPLN	28.5–31.5	50	Two-mirror straight cavity	3.24–3.82	12.09 W@3.114 μm and 4.25 W@3.81 μm	[82]
Nd : YVO ₄ laser	7.4	1064	—	0.22	PPLN	30.2	50	Two-mirror straight cavity	3.187–3.327	477.8 mW@3.33 μm	[83]
Yb fiber laser	191	—	—	—	PPLN	—	—	Two-mirror straight cavity	3.2–3.9	33 W@3.35 μm	[84]
Nd : YVO ₄ laser	5.5	1064	—	2.8@LD	PPLN	28.5–31.5	40	Two-mirror straight cavity	2.95–4.16	410 mW@3.2 μm	[85]
Yb fiber laser	100	1064	—	20	PPLN	30.5	50	Four-mirror ring cavity	—	11 W@3.4 μm	[86]
Nd : YAG laser	0.5	1064	1×10^{-6}	—	PPLN	—	—	Four-mirror ring cavity	2.7–4.2	—	[87]
Fiber laser	74.1	1060	—	16	PPLN	31	50	Four-mirror ring cavity	—	6.4 W@3.136 μm	[88]
Nd : YVO ₄ laser	12.4	1064	—	—	PPLN	28.5–31.5	50	Two-mirror straight cavity	2.95–4.16	1.27 W@3.224 μm	[89]
Nd : YVO ₄ laser	—	1064	—	1.5	PPLN	31.52	40	Two-mirror straight cavity	—	0.55 W@3.17 μm	[90]
Yb fiber laser	0.4	1064	—	—	PPLN	—	35	Nested double cavity	3.3–3.5	25 mW	[91]
Nd : YVO ₄ laser	12.4	1064	—	—	PPLN	30.5	50	Three-mirror linear cavity	—	1.32 W@3.394 μm	[92]
Yb fiber laser	15.2	1064	—	—	PPLN	29.5–31	50	Four-mirror ring cavity	3.1–3.8	—	[93]

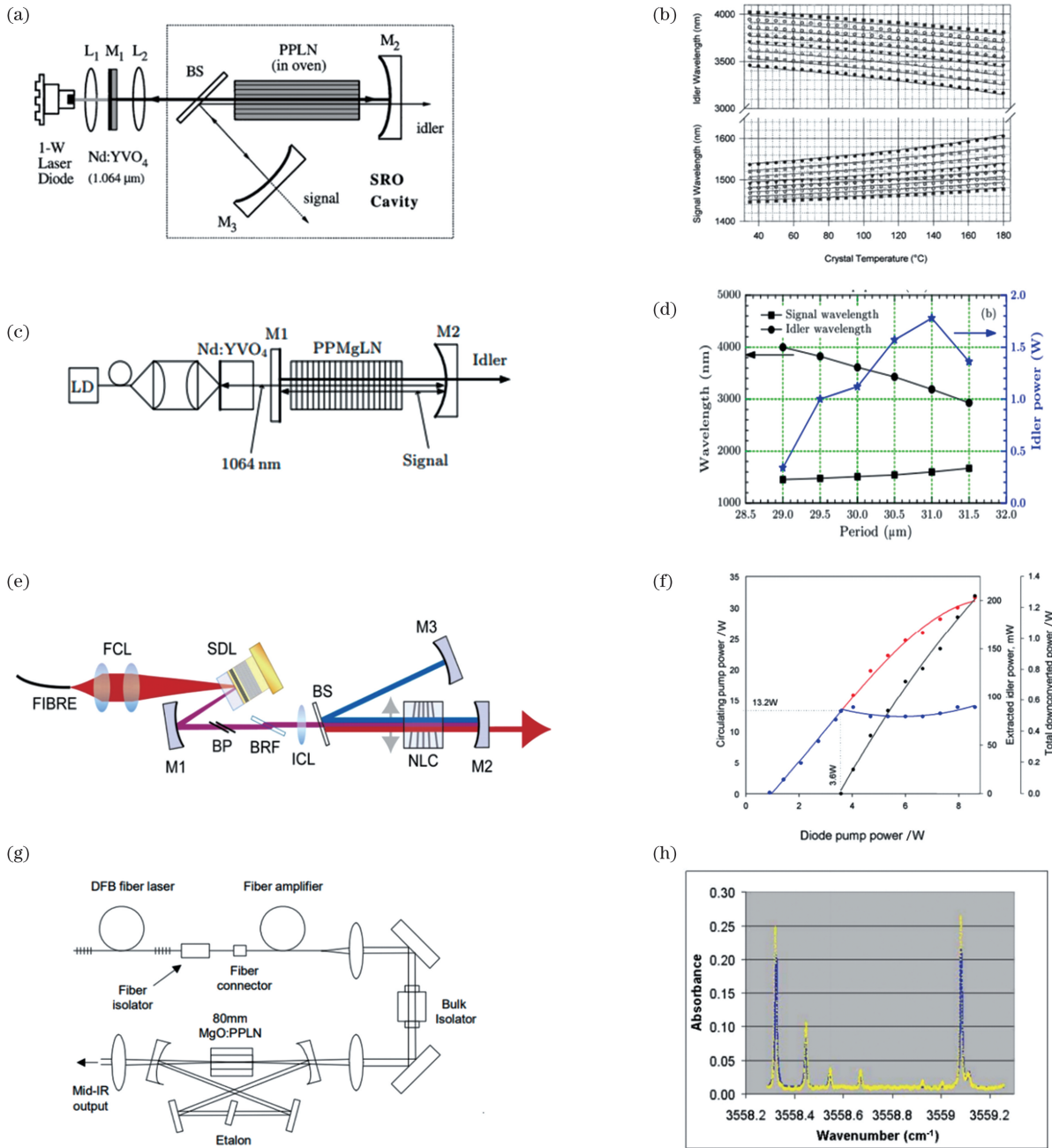


图 3 基于光学超晶格晶体的 2~5 μm 连续波中红外 OPOs。(a)LD 泵浦 Nd : YVO₄ 内腔单谐振三镜 L 型复合腔 OPO 结构及 (b) 对应的 3.66 μm 闲频光的功率输出曲线^[57] ; (c)LD 泵浦 Nd : YVO₄ 内腔单谐振两镜线性复合腔 OPO 结构及 (d) 闲频光的输出功率和波长调谐曲线^[60] ; (e)VECSEL 泵浦扇形 PPLN 内腔 OPO 结构及 (f) 闲频光输出功率曲线^[64] ; (g)DFB 光纤激光器泵浦窄线宽 PPLN-OPO 结构示意图及 (h) 基于该光源测试的 CO₂ 吸收谱线^[71]

Fig. 3 2–5 μm CW mid-infrared OPOs based on optical superlattice crystals. (a) LD-pumped Nd : YVO₄ intracavity single resonant three-mirror L-type composite cavity OPO structure and (b) corresponding output power curves of 3.66 μm idler light^[57] ; (c) LD-pumped Nd : YVO₄ intracavity single resonator two-mirror linear composite cavity OPO structure and (d) output power and wavelength tuning curves of idler light^[60] ; (e) VECSEL-pumped fan-shaped PPLN intracavity OPO structure and (f) output power curves of idler light^[64] ; (g) structural diagram of narrow-linewidth PPLN-OPO pumped by DFB fiber laser and (h) CO₂ absorption spectral lines measured by it^[71]

[如图 3(c)所示], 获得了 1.9 W 的 3.19 μm 连续波中红外激光输出, 功率输出和波长调谐曲线如

图 3(d)所示。2010 年, 檀慧明等^[61]采用 8.75 W 的 1064 nm 连续波激光作为泵浦源, 实现了 3.13~

4.2 μm 宽调谐中红外激光输出,在 3.2 μm 处的输出功率为 905 mW。内腔泵浦 OPO 可以充分利用全固态激光器腔内较高的功率密度,实现连续波 OPO 低阈值高效率运转。但是,由于腔内同时存在激光晶体和光学超晶格晶体,因此存在模式匹配和热效应的问题,输出稳定性和光束质量相对较差。

随着 LD 功率的不断提高,采用 LD 直接泵浦光学超晶格材料可以得到小型化中红外 OPO。2001 年,Lindsay 等^[62]采用 810 nm 的 AlGaAs LD 泵浦 PPLN 晶体,并采用泵浦增强单谐振结构,实现了 2.58~3.44 μm 的宽调谐连续波中红外激光输出,阈值只有 25 mW 左右。1999 年,Klein 等^[63]采用 InGaAs 半导体激光器泵浦 PPLN 晶体,并采用四镜环型腔,实现了 480 mW 的 2.1 μm 中红外激光输出,调谐范围为 2.03~2.29 μm 。2009 年,Stoithard 等^[64]采用 VECSEL 半导体激光器泵浦扇形 PPLN 晶体(周期为 29.5~32.8 μm),OPO 的实验装置示意图如图 3(e)所示,获得了 205 mW 的宽调谐中红外激光输出,功率输出曲线如图 3(f)所示。2010 年,Nieuwenhuis 等^[65]采用 LD 泵浦 50 mm 长的 PPLN 晶体,实现了 3.15~3.41 μm 的连续波中红外激光输出,在 3.4 μm 处的输出功率达到 1.1 W。

与全固态激光器和半导体激光器相比,光纤激光器具有结构灵活紧凑、可靠性高、环境适用性好、光束质量好和成本低等优点,基于光纤激光器泵浦的光学超晶格 OPO 为新一代小型化高功率宽调谐中红外激光光源提供了新的发展思路。2002 年,Gross 等^[66]利用 Yb 连续波激光器泵浦 PPLN 晶体,实现了 1.9 W 的连续波中红外激光输出。2005 年,Chen 等^[70]采用 50 W 的 Yb 连续波光纤激光器泵浦 PPLN 晶体,获得了 10 W 的 2.94 μm 中红外激光输出。2010 年,Henderson 等^[76]采用同样的结构获得了 6.2 W 的 3.6 μm 连续波中红外输出。Powers 等^[77]报道了光纤激光泵浦连续波 PPLN-OPO,在 3070 nm 中红外激光下输出功率达到 7.7 W,光束质量 < 1.24 。Zhao 等^[74]利用 1064.7 nm 的光纤激光器泵浦 PPLN 晶体,实现了 2.9~4.1 μm 宽调谐中红外激光输出,在 3.03 μm 处输出功率为 7.54 W,在 4.05 μm 处输出功率为 1.04 W。2013 年,刘磊等^[82]采用 Yb 光纤激光器泵浦 PPLN 晶体,获得了 12.09 W 的 3.414 μm 连续波激光输出,量子转换效率达到 79.2%;在波长为 3.81 μm 时输出功率达到 4.25 W,同时实现了

3.24~3.82 μm 宽调谐输出。2013 年,许晓军等^[84]采用光纤激光泵浦 PPLN 晶体,实现了 3.2~3.9 μm 宽调谐连续波激光输出,最大功率为 34.2 W。

为了满足气体探测、精密光谱分析等对单频、宽调谐中红外连续激光的需求,人们开展了基于光学超晶格晶体的窄线宽连续波中红外 OPO 研究。由于非线性晶体的增益带宽较宽(nm 级),在一般的谐振腔长度下,会有多个纵模同时振荡。因此,为了得到窄线宽连续波 OPO 输出,需要采取一定的措施对信号光或闲频光的线宽进行控制,一般采用四镜环形腔加标准具结构。van Herpen 等^[67]采用单频连续波 Nd:YAG 激光作为泵浦源,实现了 3~5 μm 宽调谐单频连续波中红外激光输出。为了满足气体探测对单频连续波中红外激光快速调谐输出的要求,Vainio 等^[73]采用单频连续可调的钛宝石激光作为泵浦源,实现了 2.5~3.5 μm 和 3.4~4.4 μm 范围的单频连续波中红外激光输出,频率扫描范围达到 40 GHz。2006 年,Henderson 等^[71]采用 1083 nm 的单频光纤激光器作为泵浦源,实现了 2.65~3.20 μm 波段单频连续波中红外激光输出,窄线宽 OPO 实验结构示意图如图 3(g)所示,输出功率为 500 mW 时线宽仅为 1 MHz,并利用该光源测量了 CH₄ 和 CO₂ 气体的吸收谱,其中测得的 CO₂ 吸收谱如图 3(h)所示。2008 年,Vainio 等^[72]采用四镜腔结构,实现了瓦级的 2.70~3.45 μm 单频连续波中红外激光输出,且数小时内无跳模现象。Lin 等^[81]采用单谐振四镜腔结构,通过在腔内插入标准具,实现了线宽为 5 MHz 的单频连续中红外激光输出,并观察到了双稳现象。2011 年,Kumar 等^[79]基于 PPSLT 实现了 3.032~3.462 μm 连续波单频 OPO 运转,输出功率大于 2 W。2013 年,Barria 等^[91]利用嵌套双腔双共振 OPO 技术,获得了单频 3.3~3.5 μm 参量光输出,该波段激光被用于痕量气体探测。2014 年,Zeil 等^[86]利用环形腔 OPO 并结合体布拉格光栅的选频作用,实现了 11 W 单频 3.4 μm 激光输出。2014 年,Ricciardi 等^[87]采用主动伺服系统,在环形腔 PPLN OPO 中获得了线宽小于 1 kHz 的连续波单频 2.7~4.2 μm 输出。

山东大学何京良教授课题组采用高功率 1064.2 nm 全固态单频(线宽约为 20 kHz)激光器作为泵浦源,采用四镜环型腔双谐振结构,实现了宽调谐窄线宽 2~5 μm 中红外激光输出^[28],实验装置图如图 4(a)所示。光学隔离器可防止反射光对泵

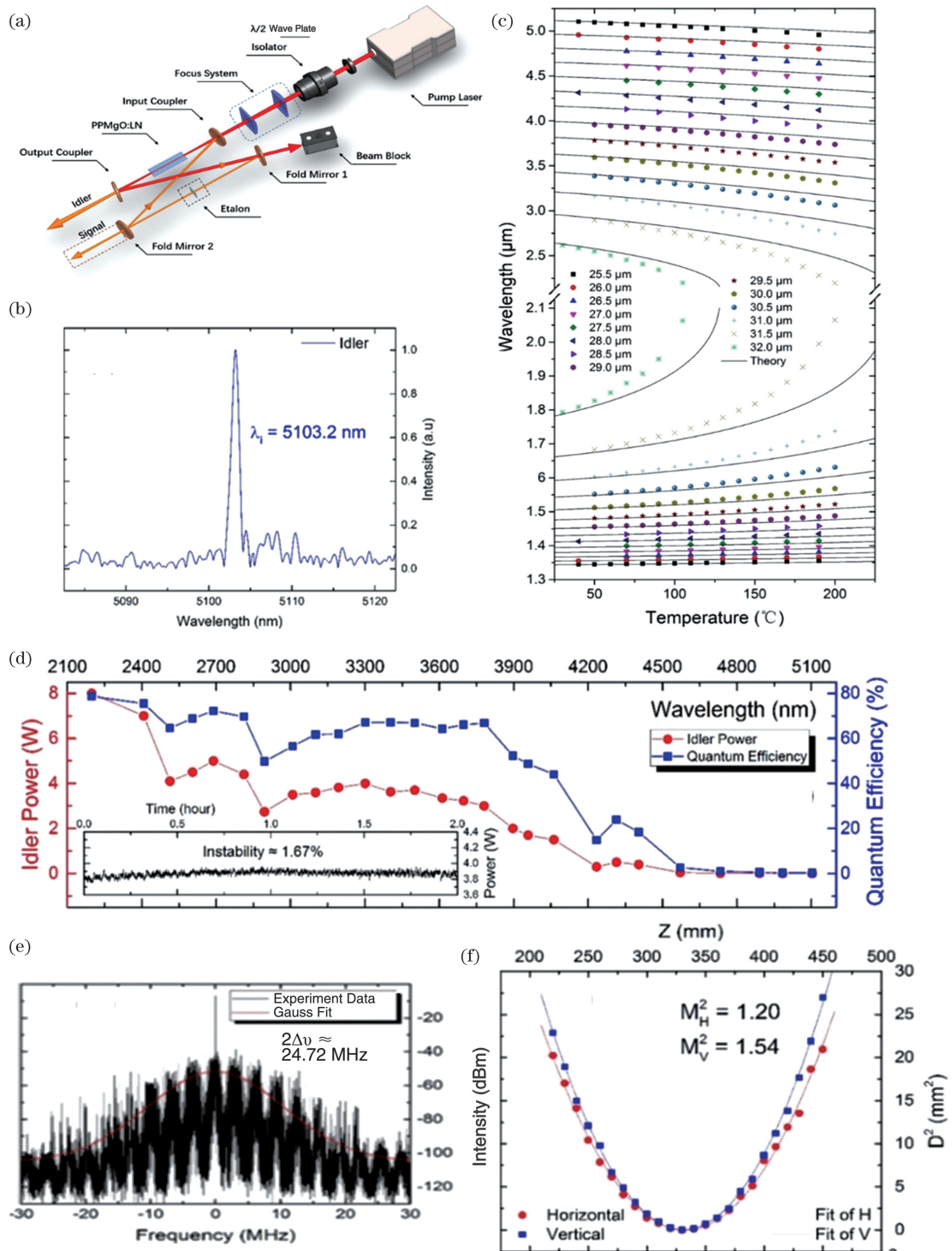


图 4 基于多周期 PPLN 的 2~5 μm 窄线宽连续波 OPO^[28]。(a) OPO 实验结构示意图；(b) 实验得到的最长闲频光波长的输出光谱；(c) 窄线宽连续波 OPO 的波长调谐曲线；(d) 泵浦功率为 27.5 W 时闲频光的输出功率和光子转换效率随波长的变化曲线；(e) 采用延时自零差法测试得到的信号光线宽；(f) 3497.1 nm 闲频光的输出功率为 3.3 W 时的光束质量

Fig. 4 2–5 μm narrow-linewidth CW OPO based on multi-period PPLN^[28]. (a) Experimental setup of OPO; (b) experimentally obtained output spectrum of idle light with longest wavelength; (c) wavelength tuning curves of narrow-linewidth CW OPO; (d) output power and photon conversion efficiency of idle light versus wavelength at pump power of 27.5 W; (e) linewidth of signal light measured by delay self-zero difference method; (f) beam quality of 3497.1 nm idle light at output power of 3.3 W

浦源的干扰,并与半波片组合形成可变光衰减器,起到调节泵浦功率的作用,保证 PPLN 晶体内的泵浦光光斑分布不变,进而确保泵浦基频激光的偏振方向平行于 PPLN 的 Z 轴方向。由两个柱面透镜组成的聚焦系统分别在水平和垂直方向对泵浦光进行整形,使其共同聚焦到非线性晶体的中心位置,光斑束腰直径约为 $90\ \mu\text{m}$ 。PPLN 晶体和标准具分别位于腔内的两个束腰位置,标准具用于压缩信号光线宽。由于 PPLN 晶体和 OPO 腔镜镀膜技术的限制,实验中使用了两块 PPLN 晶体和两套镀膜参数不同的谐振腔镜。两块晶体共有 14 个极化周期,每块晶体的周期分别为 $25.5\sim 30.5\ \mu\text{m}$ 和 $31.0\sim 32.0\ \mu\text{m}$,周期间隔同样为 $0.5\ \mu\text{m}$,长度为 $46\ \text{mm}$,厚度为 $1\ \text{mm}$,MgO 的掺杂浓度(原子数分数)为 5%。PPLN 晶体放置在温度稳定度为 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 的自制温控炉内,温度在室温至 $200\ ^\circ\text{C}$ 范围内可调。实验实现了 $1344.6\sim 5103.2\ \text{nm}$ 范围内的连续可调谐,调谐范围达 $3758.6\ \text{nm}$,其中信号光和闲频光的波长调谐范围分别为 $783.8\ \text{nm}$ ($1344.6\sim 2128.4\ \text{nm}$)和 $2974.8\ \text{nm}$ ($2128.4\sim 5103.2\ \text{nm}$)。图 4(b)给出了所能得到的最长闲频光波长的光谱,最长闲频光波长为 $5103.2\ \text{nm}$ 。图 4(c)给出了 PPLN-OPO 在不同周期下的温度调谐曲线,可以看到,在整个输出范围内均可以实现连续调谐,一些相邻周期的输出波长还有部分重叠;实验得到的 OPO 输出波长随周期和温度的变化与理论计算结果在低温时吻合较好,高温时差别较大,这主要是因为温控装置测得的晶体温度与晶体实际温度存在差异,高温下差异更大。

图 4(d)给出了泵浦光功率为 $27.5\ \text{W}$ 时 $2.2\sim 5.1\ \mu\text{m}$ 闲频光的输出功率和光子转换效率随波长的变化。 $2.2\ \mu\text{m}$ 处的最高输出功率为 $8\ \text{W}$,随着波长的增长,输出功率逐渐降低, $2.7, 3.8, 4.3, 5.1\ \mu\text{m}$ 处的输出功率分别为 $5, 3, 0.5, 0.003\ \text{W}$ 。这主要是因为波长越长,量子亏损越大,并且 PPLN 晶体在波长为 $4\ \mu\text{m}$ 以上时存在较大的吸收。当输出闲频光波长为 $3497.1\ \text{nm}$ 时,采用延时自零差法测得的信号光的线宽为 $12.36\ \text{MHz}$,如图 4(e)所示,而泵浦基频光的线宽约为 $20\ \text{kHz}$,远小于 $12.36\ \text{MHz}$,所以闲频光的线宽与信号光线宽在同级别。图 4(f)给出了 $3497.1\ \text{nm}$ 闲频光的输出功率为 $3.3\ \text{W}$ 时的光束质量,垂直方向和水平方向的光束质量因子分别为 1.54 和 1.2 。

连续波的激光功率密度低,与体块本征非线性

光学相比,光学超晶格晶体的有效非线性系数大,可利用的晶体长度长,因此在连续波 OPO 方面更具优势。目前,基于光学超晶格的 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 连续波 OPO 的最窄线宽为 $1\ \text{kHz}@2.7\sim 4.2\ \mu\text{m}$ ^[87],最宽调谐范围为 $2128.4\sim 5103.2\ \text{nm}$ 。连续波 OPO 可以有效避免脉冲激光泵浦 OPO 引起的光损伤等问题,但与脉冲 OPO 相比,功率密度低,因此转换效率相对较低。连续波 OPO 在精密光谱分析、气体探测等方面具有重要的应用价值,并且随着半导体激光器和光纤激光器的飞速发展,基于半导体激光直接泵浦和光纤激光泵浦的连续波光学超晶格 OPO 在输出功率、调谐范围、体积、功耗和重量等方面有着巨大的优势,已引起国内外研究人员的广泛关注。

3.2 基于光学超晶格晶体的 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 纳秒中红外 OPO 的研究进展

纳秒脉冲中红外激光在遥感、医疗、军事对抗和无线光通信等领域具有非常重要的应用价值。相比连续波激光,纳秒脉冲激光具有很高的峰值功率,易于实现高效率的非线性频率变换,得到了广泛的研究。相比于其他非线性参量晶体,基于光学超晶格晶体的纳秒 OPO 具有输出功率高、转换效率高、波长调谐范围宽、调谐方式简便等优点,成为高功率宽调谐纳秒中红外激光光源的主流发展方向。表 3 为基于光学超晶格的 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 纳秒中红外 OPO 的主要进展及性能参数。

1996 年, Bosenberg 等^[94]利用具有 25 个极化周期(超晶格的周期为 $26\sim 32\ \mu\text{m}$,间隔为 $0.25\ \mu\text{m}$)的 PPLN 晶体,实现了 $1.36\sim 4.83\ \mu\text{m}$ 宽调谐输出。1997 年, Myers 等^[95]利用纳秒 Nd:YAG 激光作为泵浦源,并采用单谐振结构,在 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 范围内实现了大于 $3\ \text{W}$ 的调谐中红外激光输出。2004 年, Th Bekman 等^[96]实现了波长调谐范围为 $3.7\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 的中红外激光输出,斜效率为 15%。2007 年, Zhang 等^[97]利用 $10.2\ \text{W}$ 的纳秒 Nd:YAG 激光泵浦 PPLT 晶体,分别得到了 $1.0\ \text{W}$ 的 $4.03\ \mu\text{m}$ 和 $0.2\ \text{W}$ 的 $4.685\ \mu\text{m}$ 中红外激光输出。2009 年, Alam 等^[98]采用光纤脉冲激光器泵浦 PPLN,得到了 $2.7\ \text{W}$ 的 $3.5\ \mu\text{m}$ 中红外激光输出。彭跃峰等^[99]采用 $1064\ \text{nm}$ 声光调 Q 的 Nd:YAG 侧泵模块激光器泵浦 PPLN 晶体,为了避免晶体损伤,采用了椭圆形光斑,实现了 $16.7\ \text{W}$ 的 $3.84\ \mu\text{m}$ 中红外参量光输出,但是光束质量较差;到 2010 年, Wei 等^[100]又将中红外输出功率提升

表 3 基于光学超晶格的 2~5 μm 纳秒中红外 OPO 的主要进展及性能参数
Table 3 Main progress and performance parameters of 2~5 μm ns mid-infrared OPOs based on optical superlattice crystals

Laser style	Pump source				Length / mm	Cavity	Mid-infrared wavelength tuning range / μm	Mid-infrared output	Ref.
	Output	Wavelength / nm	Repetition rate / kHz	Pulse duration / ns					
Nd : YAG laser	Output power of 5.8 W @10 kHz	1064	0~50	40	15	Two-mirror straight cavity	2.8~4.8	Output power of 0.6 W@3.45 μm	[94]
Nd : YAG laser	Output power of 5.8 W	1064	10	20	15	Two-mirror straight cavity	3~4	Output power of 2 W@3.6 μm	[95]
Nd : YVO ₄ laser	Output power of 3 W	1064	30	10	50	Two-mirror straight cavity	1.5~4	Output power of 130~160 mW @3~4 μm	[96]
Tm, Ho : GdVO ₄ laser	Output power of 3 W	—	10	25	50	Two-mirror straight cavity	3.87~4.43	Output power of 195 mW@3.88 μm	[97]
Yb fiber laser	Output power of 26.5 W	1062	50	100	50	Two-mirror straight cavity	—	Output power of 2.7 W@ 3.5 μm	[98]
Nd : YAG laser	Output power of 94 W	1064	8	—	—	Two-mirror straight cavity	—	Output power of 11.2 W@3.84 μm	[99]
Nd : YAG laser	—	1064	—	—	50	Two-mirror straight cavity	4.2~4.4 and 2.6~3.1	—	[100]
Nd : YVO ₄ laser	Output power of 48.2 W	1063	52	—	50	Two-mirror straight cavity	1.063~3.820	Output power of 9.23 W@ 3.82 μm	[101]
Nd : YAG laser	Output energy of 16 μJ	1064	4.8	9.8	4.5	Nested double cavity	3.8~4.3	Output energy of 0.3 μJ @3.89 μm	[102]
Fiber laser	Output power of 58 W	1060	—	100,48,24,20	50	Two-mirror straight cavity	—	Output power of 5.5 W@3.8 μm	[103]
Nd : YAG laser	Output energy of 709 mJ	1064	0.030	10	38	Two-mirror straight cavity	—	Output energy of 540 mJ @2.4 μm	[104]
Yb fiber laser	Output power of 10.15 W	1064	40	75	50	Two-mirror straight cavity	—	Output power of 1.22 W@3.6 μm	[105]
Nd : YAG laser	Output power of 151 W@10 kHz	1064	—	—	50	Two-mirror straight cavity	3.7~4.0	Output power of 23.7 W @ 3.91 μm	[106]
Fiber laser	Output power of 37 W	1064	50	200	40	Two-mirror straight cavity	3.0788 and 3.2311	Output power of 3.62 W@3231.1 nm	[107]
Nd : YAG laser	Output power of 310 W	1064	20	65	50	Two-mirror straight cavity	2.68~3.07	Output power of 74.6~66.7 W@ 2.68~3.07 μm	[108]
Nd : YVO ₄ laser	Output power of 15 W @20 kHz	1064	—	15	19	Two-mirror straight cavity	3.323~3.885	Output power of 0.72 W@3.408 μm	[109]
Nd : YAG laser	—	1342	—	—	20	Two-mirror straight cavity	3.9~4.6	Output power of 850 mW @3.9 μm and 4.6 μm	[110]

续表

Pump source		Nonlinear crystal	Period / μm	Length / mm	Cavity	Mid-infrared wavelength tuning range / μm	Mid-infrared output	Ref.			
Laser style	Output								Wavelength / nm	Repetition rate / kHz	Pulse duration / ns
Ti : sapphire laser	Output power of 6.1 W@10 kHz	797	—	38.4	PPLN	20.5	20	Two-mirror straight cavity	>3.384	—	[111]
Nd : YLF laser	Output energy of 300 μJ @ 1-7 kHz	1053	—	5-7	PPLN	27.91-31.59	20	Two-mirror straight cavity	2.10-4.96	Output energy of 3.7 μJ @4.3 μm	[112]
Nd : YAG laser	Output power of 6 W@10 kHz	1064.2	—	170-210	PPLN	29.50-31.75	40	X-shaped cavity	2.287-2.901	Output power of 3.6 W	[113]
Tm : YLF laser	Output power of 8 W	1907.5	2	110	PPLN	30.5	50	Two-mirror straight cavity	3.6-4.1	Output power of 900 mW@3.6 μm and 4 μm	[114]
Nd : GdVO ₄ laser	Output power of 10.5 W @ 200 kHz	1063	—	—	PPLN	29	50	Two-mirror straight cavity	3.7-3.9	Output power of 1.82 W@3.85 μm	[115]
Nd : YVO ₄ laser	Output power of 10.95 W @50 kHz	1064	50	—	PPLN	28.5-31.5	50	Two-mirror straight cavity	2.40-4.17	Output power of 3.02 W@ 2.78 μm	[116]
Yb fiber laser	Output power of 20 W	1064	—	200	PPLN	28.5-31.5	50	Two-mirror straight cavity	3.0-3.9	Output power of 1.73 W@3 μm and output power of 1.03 W@3.7 μm	[117]
Nd : YVO ₄ laser	Output power of 17.5 W@15 kHz	1064	15	—	PPLN	32	20	Two-mirror straight cavity	2.1000-2.1296	Output power of 3.7 W@2.1 μm	[118]
Nd : GdVO ₄ laser	Output power of 34 W@10 kHz	1060	—	—	PPLN	29.1	40	Two-mirror straight cavity	3.810-3.816	Output power of 5.4 W@3.81 μm	[119]
Tm : Lu ₂ O ₃ ceramic laser	Output power of 10-12 W	1966	10-30	40-100	PPLN	29.7	20	Two-mirror straight cavity	3.9	Output power of 530 mW@3.9 μm	[120]
Fiber laser	Output power of 14 W	1064	75	315	PPLN	31.2	45	L-shaped cavity	2.85-3.15	Output power of 2.6 W@3 μm	[121]
Nd : YAG laser	Output power of 17.8 W	1064	80	23	PPLN	32.16	50	Two-mirror straight cavity	2.128-2.451	Output power of 1.1 W@2320 nm	[122]
Nd : YVO ₄ laser	Output power of ~15 W	1060	60	~9	PPLN	28.46	50	V-shaped cavity	4.125	Output power of 1.12 W@4125 nm	[123]
Nd : YAG laser	Output power of 1.8 W	532	25	8.4	PPLT	7.75-10.25	29	Two-mirror straight cavity	1.137-2.479	Output power of 131 mW@1374.7 nm	[124]
Nd : YVO ₄ laser	Output power of 10.4 W	1064	80	~9	PPLN	32.25	50	V-shaped cavity	—	Output power of 5.9 W@2.1 μm	[125]
Tm : YAP laser	Output power of 6.17 W@6 kHz	1950	6-10	45	PPLN	30.2	25	Two-mirror straight cavity	—	Output power of 1.2 W@3.87 μm	[126]

到 22.6 W@3.86 μm , 依然采用椭圆的泵浦光斑, 但水平方向和垂直方向的光束质量因子分别提高到 1.74 和 4.86。2010 年, Wu 等^[101] 利用半外腔结构的补偿热效应, 在 52 kHz 重复频率下得到了 9.2 W 的 3.8 μm 中红外激光, 光-光转换效率和斜效率分别为 19.2% 和 29.4%, 接近量子转换极限。2011 年, Hardy 等^[102] 采用 Nd:YAG 被动调 Q 微片激光器作为泵浦源, 利用嵌套双腔结构实现了 3.8~4.3 μm 单频脉冲中红外激光输出。2012 年, Lin 等^[103] 进一步提高泵浦源的功率, 在 58 W 泵浦下获得了 5.5 W 的 3.82 μm 中红外激光输出。Ishizuki 等^[104] 采用 10 mm 厚的 PPLN 晶体, 得到了 540 mJ 的脉冲参量光输出, 光-光转换效率达到 76%。Wu 等^[105] 采用纳秒光纤激光器泵浦多周期 PPLN 晶体, 在 3.43, 3.63, 3.72, 3.83, 3.99 μm 处分别实现了 4.7, 4.3, 4.1, 3.3, 2.1 W 的中红外激光输出。

Peng 等^[106] 采用 3 mm 厚的 PPLN 晶体作为参量晶体, 在泵浦功率为 151 W 时实现了 27.4 W 的 3.91 μm 中红外激光输出, 斜效率为 20.9%, 光束质量因子 < 2.3, 并且在 3 μm 处的平均输出功率高于 40 W。2015 年, 赵刚等^[107] 利用光纤激光器泵浦双通道 PPSLT 晶体, 有效避免了泵光能量的浪费, 实现了四波长近-中红外参量光的同时输出, 实验装置如图 5(a) 所示, 在 3.23 μm 和 3.07 μm 处的输出功率分别达到 3.43 W 和 3.72 W, 闲频光的波长调谐范围分别为 3231.1~3293.4 nm 和 3078.8~3146.6 nm, 如图 5(b) 所示。2016 年, Peng 等^[108] 采用 OPO+OPA 技术方案, 实验装置如图 5(c) 所示, 利用 310 W 声光调 Q Nd:YAG 激光器作为泵浦, 获得了 74.6~66.7 W 的 2.68~3.07 μm 参量光输出, 如图 5(d) 所示, 功率达到国际领先水平。

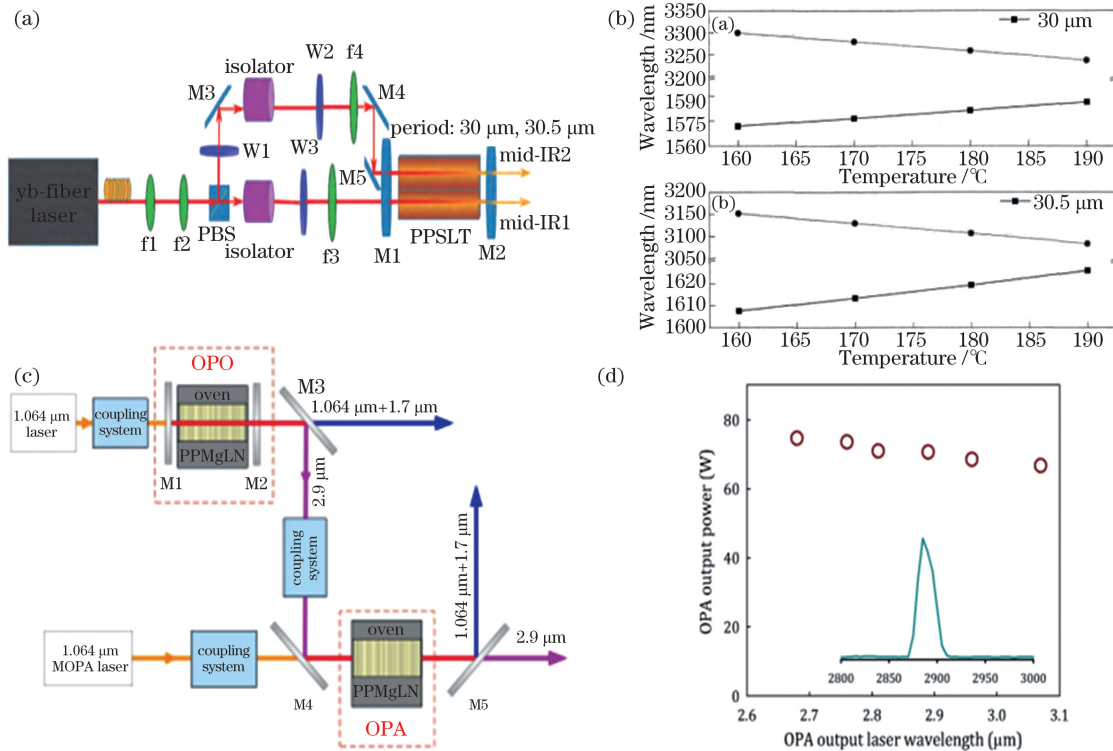


图 5 基于光学超晶格晶体的 2~5 μm 纳秒中红外 OPOs。(a) 四波长近-中红外 OPO 实验示意图和 (b) 对应的双周期 OPO 的波长调谐范围^[107]; (c) 高功率 OPO+OPA 实验结构示意图和 (d) 对应的 OPA 输出功率曲线^[108]

Fig. 5 2~5 μm ns mid-infrared OPOs based on optical superlattice crystals. (a) Experimental setup of four-wavelength near-mid-infrared OPO and (b) corresponding wavelength tuning range of double-period OPO^[107]; (c) experimental setup of high power OPO+OPA and (d) corresponding output power curve of OPA^[108]

除了采用成熟的 1 μm 激光作为泵浦源外, 2 μm 激光泵浦 PPLN-OPO 可以使输出的信号光和闲频光均落在 3~5 μm 波段, 大大提高中红外 OPO 的转换效率。2012 年, Xu 等^[114] 采用 1.9 μm

的 Tm:YLF 激光器作为泵浦源, 获得了 900 mW 的 3~5 μm 波段信号光和闲频光输出, 总的光-光转换效率为 31%。2020 年, 本课题组采用 1.94 μm 声光调 Q 的 Tm:YAP 激光器泵浦 PPLN, 在泵浦

功率为 6.17 W 时获得了 1.2 W 的 $3.87 \mu\text{m}$ 中红外激光输出,光-光转换效率达到 19.4%^[26]。

山东大学何京良教授课题组采用高功率纳秒 1064 nm 激光器作为泵浦源,并采用 2 mm 厚的 PPLN 晶体,实现了高功率高效率的简并点 OPO 参量光输出^[28],实验装置如图 6(a)所示。采用双通双谐振线形直腔,腔长约为 60 mm。输入耦合镜的镀膜参数为 HT@1064 nm,HR@1.7~2.0 & 2.4~2.9 μm ,输出耦合镜的镀膜参数为 HR@1064 nm, $T = 25\% @ 1.7\sim 2.8 \mu\text{m}$,其中 HT 表示高透,HR 表示高反, T 为透过率。大功率 1064 nm 纳秒基频激光经二分之

一波片的偏振转换和光隔离器的隔离后,利用透镜组对其进行整形,整形后的激光入射到 PPLN 晶体上。为了保证泵浦基频光的参数(束腰大小等)不变,使用波片和隔离器组成的可变光衰减器,对入射到超晶格的光功率进行调节。采用的 PPLN 晶体的长度为 50 mm,周期为 $32.0 \mu\text{m}$,温度控制在 $97.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 6(b)给出了简并点 OPO 的输出功率随泵浦功率的变化,由于采用双谐振结构,管参量阈值明显降低,约为 2.7 W。在泵浦功率为 60.9 W 时,得到的 OPO 的输出功率为 33.3 W,光-光转换效率为 54.7%。图 6(c)给出了不同泵浦功率下的 OPO 输

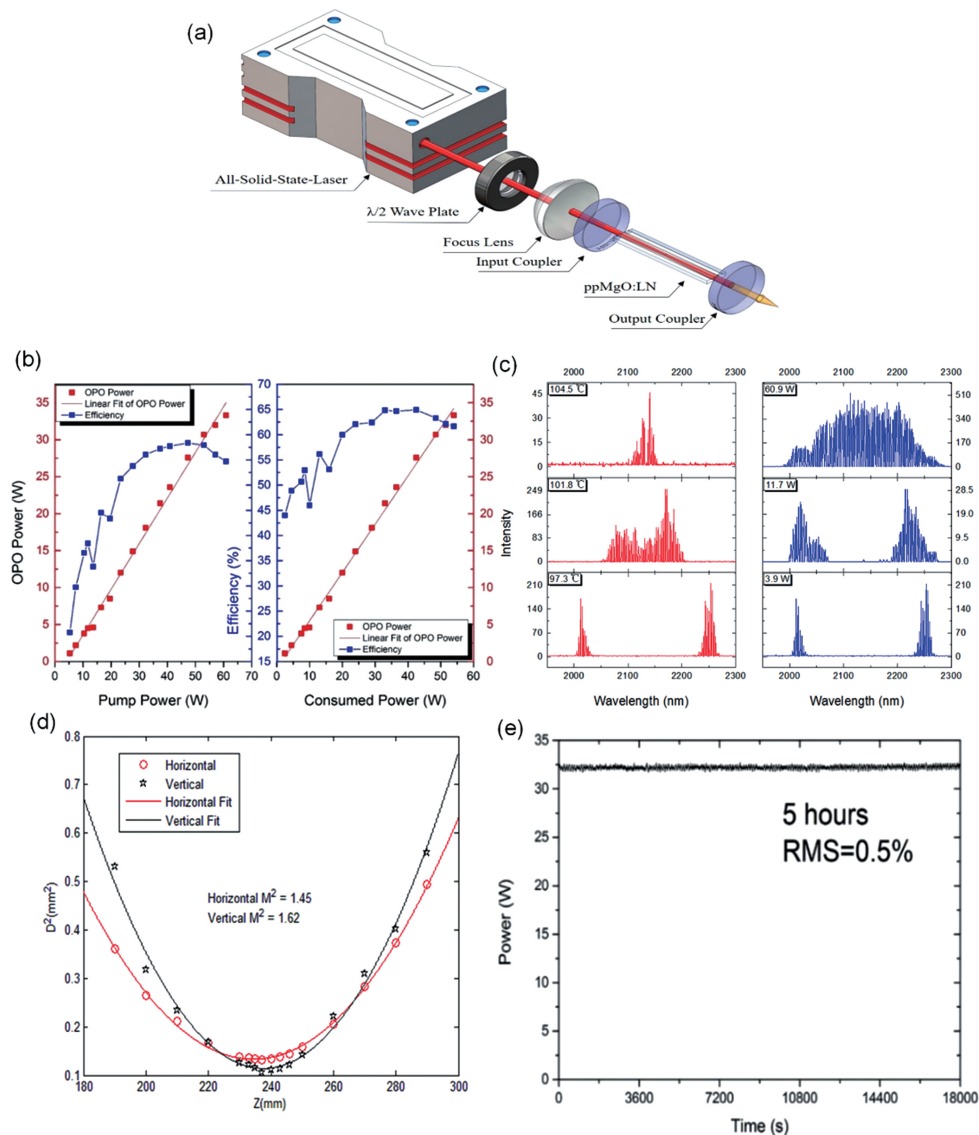


图 6 基于 2 mm 厚的 PPLN 的高功率 $2.1 \mu\text{m}$ 简并点纳秒 OPO^[28]。(a) OPO 实验结构示意图;(b) OPO 的输出功率曲线;(c) OPO 的输出波长随温度和泵浦功率的变化;(d)最高输出功率下的光束质量;(e)最高输出功率下 5 h 功率稳定性测试结果

Fig. 6 High power $2.1 \mu\text{m}$ degenerate point ns OPO based on 2 mm thick PPLN^[28]. (a) Experimental setup of OPO; (b) output power curves of OPO; (c) output wavelength of OPO versus temperature and pump power; (d) beam quality at highest output power; (e) test result of power stability @5 h at maximum output power

出光谱,在最大泵浦功率下,光谱覆盖范围为 1996~2279 nm(半峰全宽为 253 nm)。在最高输出功率下,利用刀口法测量其光束质量,水平和垂直方向上的光束质量因子分别为 1.45 和 1.62,如图 6(d)所示。图 6(e)给出了输出功率为 32.5 W 时其功率稳定性的测试结果,5 h 内的功率不稳定性均方根(RMS)值为 0.5%。较高的功率稳定性主要是因为,在较宽的光谱范围内,谐振的信号光和闲频光的各个纵模之间即便存在竞争,也会被如此多的模式共同作用的效果掩盖。此外,采用极化周期为 29.0 μm 、厚度为 2 mm 的 PPLN 晶体,并采用双通单谐振的结构(输入耦合镜的镀膜参数为 HT@1064 nm,HR@1.35~1.6 μm &3.8~4.5 μm ,输出耦合镜的镀膜参数为 HR@1064 nm&1.35~1.6 μm ,HT@3.8~4.5 μm),当 1064 nm 泵浦光的功率为 72 W 时,得到了 10.2 W 的 3.79 μm 中红外激光输出,光-光转换效率和斜效率分别为 14.2% 和 15%。在最高输出功率下,3.79 μm 的脉冲宽度和重复频率分别为 18.65 ns 和 30 kHz,对应的单脉冲能量和峰值功率分别为 0.34 mJ 和 18.2 kW。利用刀口法测量其光束质量,水平和垂直方向上的光束质量因子分别为 1.46 和 1.5。

采用纳秒光纤激光器作为泵浦源,并采用多周期 PPLN 晶体,实现了纳秒宽调谐中红外 OPO 输出,实验装置如图 7(a)所示^[28]。利用缩束镜对光纤激光器输出的 1064 nm 基频泵浦光光斑进行压缩;利用偏振分束器对圆偏振光进行选偏,以降低进入 OPO 系统的无用偏振分量;利用由二分之一波片和隔离器组成的可变光衰减器,调节进入泵浦 PPLN 晶体的激光功率,并保护光纤激光器;光束经透镜聚焦后入射到 PPLN 晶体,束腰直径约为 100 μm ,束腰处在晶体中心位置处。谐振腔为平平腔,为双通单谐振结构,腔长约为 55 mm。与连续波 OPO 的情况类似,由于非线性晶体和 OPO 腔镜镀膜技术的限制,实验中使用了两块 PPLN 晶体和两套镀膜参数不同的谐振腔镜。两块晶体共有 13 个极化周期,两块晶体的周期分别为 25.5~29.0 μm 和 29.5~32.0 μm ,周期间隔同样为 0.5 μm ,长为 50 mm,厚度为 1 mm,MgO 掺杂浓度(原子数分数)为 5%。PPLN 晶体放置在温度稳定度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的自制温控炉内,温度在室温至 250 $^{\circ}\text{C}$ 范围内可调。首先研究了该 OPO 所能得到的最长输出波长。在泵浦功率为 18 W,晶体周期为 25.5 μm ,控制温度为 84 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,测得了 50 mW 闲频光输出,对应的

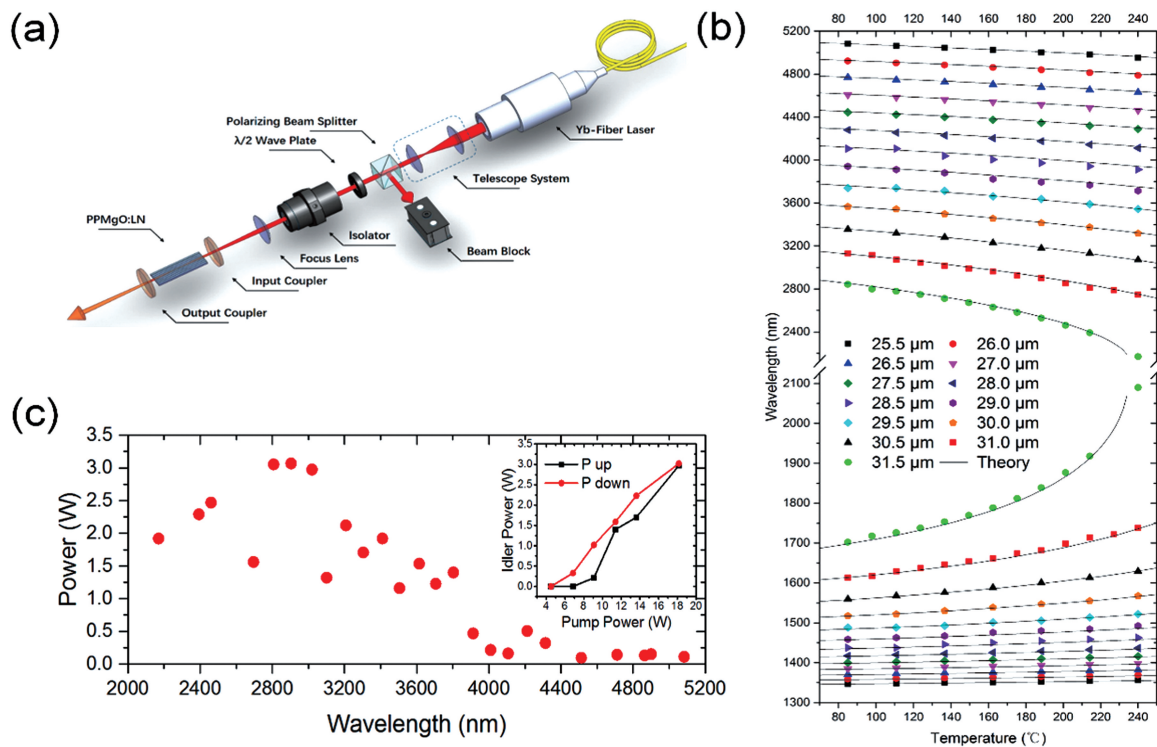


图 7 基于多周期 PPLN 的 2~5 μm 纳秒宽调谐 OPO^[28]。(a)OPO 的实验结构示意图;(b)OPO 的波长调谐曲线;(c)泵浦功率为 18 W 时闲频光的输出功率随波长的变化曲线

Fig. 7 2~5 μm wide-tuning ns OPO based on multi-period PPLN^[28]. (a) Experimental setup of OPO; (b) wavelength-tuning curves of OPO; (c) output power of idle light versus wavelength at pump power of 18 W

信号光波长为 1346.6 nm, 因此得到的最长闲频光波长为 5067.8 nm。图 7(b) 给出了输出波长与晶体周期和温度的关系, 闲频光在 2128.6 ~ 5076.8 nm 范围内可以实现连续调谐, 并且一些相邻周期的输出波长存在较大的重叠, 实验中实际得到的波长随温度和周期的变化与理论计算结果吻合很好。图 7(c) 给出了泵浦功率为 18 W 时闲频光输出功率(经过斩片滤波)随波长的变化曲线。当闲频光的波长小于 3.8 μm 时, 输出功率均高于 1 W, 覆盖约 56% 的闲频光调谐范围。在 3 μm 处得到的最大输出功率为 3 W, 总的光光转换效率为 16.7%。在大部分调谐范围内都出现了由热波导效应引起的双稳态现象, 而热波导效应有利于提高 OPO 的稳定性。当泵浦功率为 11 W 时, 采用刀口法测量了闲频光输出波长为 2.9 μm 和 3.8 μm 时的光束质量: 波长为 2.9 μm 时, 水平和垂直方向的光束质量因子分别为 1.69 和 1.92; 波长为 3.8 μm 时, 水平和垂直方向的光束质量因子分别为 1.42 和 1.55。

采用纳秒激光泵浦源, 可以有效提高 OPO 的转换效率, 获得高功率中红外激光输出, 该波段激光在遥感探测、医疗、军事对抗等方面具有重要的应用价值。但是, 纳秒脉冲激光的峰值功率高, 要特别注意高功率运转情况下超晶格晶体材料的光损伤、热畸变和光束质量控制等关键问题。目前, 基于光学超晶格晶体的 2~5 μm 纳秒 OPO 的最高输出功率达到 74.6 W@ 2.68 μm (OPO+OPA 结构)^[108], 最宽调谐范围为 2128.6~5076.8 nm。高质量大尺寸(厚度)的光学超晶格晶体结合 OPO+OPA 结构的级联方案是实现高功率纳秒中红外输出的关键。随着光纤激光器的飞速发展, 基于光纤激光泵浦的纳秒光学超晶格 OPO 有利于实现激光器的小型化、模块化和集成化, 具有重要的科学意义和军事应用价值。

3.3 基于光学超晶格晶体的 2~5 μm 皮秒中红外 OPO 的研究进展

2~5 μm 宽调谐中红外皮秒激光在激光测距、激光雷达、原子分子动力学和时域光谱学等领域具有广阔的应用前景。同步泵浦光学超晶格 OPO 是产生中红外皮秒脉冲的有效手段, 传统锁模激光器不能直接得到该波段脉冲。与连续波和纳秒 OPO 不同, 皮秒脉冲的持续时间短, 参量光在泵浦脉冲持续时间内无法在谐振腔中多次往返振荡, 难以达到光参量振荡阈值。皮秒 OPO 基于同步泵浦原理, 即 OPO 谐振腔腔长与泵浦激光器腔长匹配, 保证参量光脉冲在 OPO 腔内往返一次的时间与泵浦光脉

冲序列的重复周期相同, 从而使参量光脉冲与入射到非线性晶体的泵浦光脉冲持续发生相互作用, 参量光能量被不断放大。同步泵浦技术一般适用于较高重复频率场合下, 低重复频率泵浦光下同步泵浦 OPO 的腔长太长, 光学元件太多, 不易实现参量光振荡。

由于高重复频率的连续波锁模皮秒脉冲激光器的峰值功率较低, 因此早期的皮秒 OPO 大多采用振荡阈值较低的双谐振结构。近年来, 随着皮秒脉冲激光的产生和放大技术的发展, 基于光学超晶格晶体的单谐振 OPO 已得以实现, 它代表了皮秒 OPO 最实用、最稳定的工作模式。1996 年, Butterworth 等^[127] 采用 105 MHz、2.4 ps 的 Nd:YLF 激光泵浦 PPLN 晶体, 获得了 92 mW 的 2.37 μm 中红外激光输出。1998 年, Lefort 等^[128] 采用 120 MHz、4 ps 的 Nd:YLF 激光泵浦 PPLN 晶体, 获得了 2.7~5.3 μm 宽调谐皮秒中红外激光输出, 在 5.3 μm 处的输出功率约为 20 mW, 阈值仅为 7.5 mW。Dearborn 等^[129] 采用 100 ps、76 MHz 的 Nd:YAG 激光脉冲光泵浦 0.5 mm 厚、12 mm 长的 PPLN 晶体, 实验装置如图 8(a) 所示, 通过在腔内增加信号光和闲频光的差频过程, 闲频光的转换效率和输出功率得到极大提高, 获得了 5.7 W 的 3.5 μm 中红外激光输出, 功率输出曲线如图 8(b) 所示。2002 年, Hoyt 等^[130] 采用 76 MHz、80 ps 的 Nd:YAG 激光泵浦 47 mm 长的 PPLN 晶体, 实现了 4 W 的 2.8 μm 中红外激光输出, 波长调谐范围为 2.2~2.8 μm 。2011 年, Ruebel 等^[131] 采用 160 MHz、10 ps 的 Nd:YVO₄ 激光泵浦 10 mm 长、0.5 mm 厚的 PPLN 晶体, 实现了 1.1 W 的 4.5 μm 和 3 W 的 3 μm 中红外激光输出。2014 年, 赵刚等^[132] 采用 80 MHz、28 ps 的 1064 nm 激光泵浦 25 mm 长、0.5 mm 厚的 PPLN 晶体, 获得了 6 W 的 2.4 μm 中红外激光输出, 波长调谐范围为 2.1~4.3 μm 。近年来, 随着皮秒光纤激光器技术的发展, 皮秒光纤激光器泵浦的光学超晶格 OPO 由于具有结构简单、功耗低且易于实现小型化等优点, 成为 OPO 研究的热点。2010 年, Kokabee 等^[133] 采用 20.8 ps、81.1 MHz 的皮秒光纤激光器泵浦 50 mm 长的 PPLN 晶体, 实现了 4.6 W 的 3.33 μm 中红外激光输出, 闲频光波长调谐范围为 3.06~4.16 μm 。Kienle 等^[134] 利用脉宽为 21 ps、重复频率为 100 MHz~1 GHz 的可调谐光纤激光器泵浦 40 mm 长的 PPLN 晶体, 实验装置如图 8(c) 所示, 获得了 3.1 W 的 3.4 μm 中红外激光

输出,输出功率曲线如图 8(d)所示,闲频光波长调谐范围为 $2.9 \sim 4.4 \mu\text{m}$,可以实现 114.8, 229.6, 459.2, 918.4 MHz 的皮秒 OPO 运转。2015 年, Chaitanya Kumar 等^[135]采用 79.4 MHz、20 ps 的光纤激光器同步泵浦 35 mm 长的 PPLN 晶体,实现了 $2.41 \sim 4.3 \mu\text{m}$ 的宽调谐中红外激光输出, $2.9 \mu\text{m}$ 处的输出功率达到 1.7 W, 脉冲宽度约为 15.2 ps。2016 年, Chaitanya Kumar 等^[136]基于皮秒光纤激光器同步泵浦的高功率、高重复频率 $2.1 \mu\text{m}$ 中红外激光器,利用 79.3 MHz、20 ps 的 1064 nm 光纤激光器泵浦 50 mm 长的 PPLN 晶体,采用 X 型腔双谐振结构,在 $2.1 \mu\text{m}$ 简并点处实现了 7.1 W 的功率输出,光束质量因子约为 3.5。2019 年, Parsa 等^[137]采用 80 MHz、20 ps 的 1064 nm 光纤激光器泵浦 42 mm 长的 PPLN 晶体,采用闲频光单谐振结构,实现了 $2.19 \sim 4.02 \mu\text{m}$ 的宽调谐输出,在整个调谐范围内光束质量因子 < 1.8 , $4.0 \mu\text{m}$ 处的光束质量因子 < 1.5 。

连续波锁模全固态激光振荡器的输出功率往往较低,导致全固态激光器泵浦皮秒 OPO 的输出功率较低。为了提高皮秒 OPO 的输出功率,需要对全固态锁模激光器产生的皮秒激光进行放大,以提高皮秒

激光泵浦源的功率。2015 年, 山东大学何京良课题组利用混合腔板条放大器,得到了高功率皮秒激光^[138],然后通过泵浦多周期 PPLN 晶体,实现了闲频光波长调谐范围为 $3362 \sim 4290 \text{ nm}$ 的中红外激光输出,并且在 60% 的波长调谐范围内,输出功率超过 0.4 W。在此基础上,将 OPO 的腔长压缩为泵浦源腔长的 1/2,信号光脉冲的重复频率从 116.9 MHz 增加到 233.8 MHz,在 16 W 泵浦下,获得了 4.18 W 的 2896 nm OPO 输出,对应的转换效率为 32%。

皮秒脉冲激光的持续时间短,无法在谐振腔中往返多次而达到振荡阈值,这给皮秒 OPO 谐振腔的设计提出了更高的要求,即需要保证泵浦光脉冲时间和参量光脉冲时间交叠,实现同步泵浦。目前,基于光学超晶格晶体的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 皮秒 OPO 的最高输出功率为 $7.1 \text{ W} @ 2.1 \mu\text{m}$,最宽调谐范围为 $2.7 \sim 5.3 \mu\text{m}$ ^[136]。皮秒激光同步泵浦光学超晶格 OPO 产生的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 宽调谐中红外激光在医疗、光谱学、激光雷达、遥感探测等领域具有重要的应用价值,随着皮秒激光泵浦源功率的进一步提升,皮秒脉冲宽调谐中红外激光器的研制具有重要的科学意义和军事价值。表 4 为基于光学超晶格晶体的 $2 \sim$

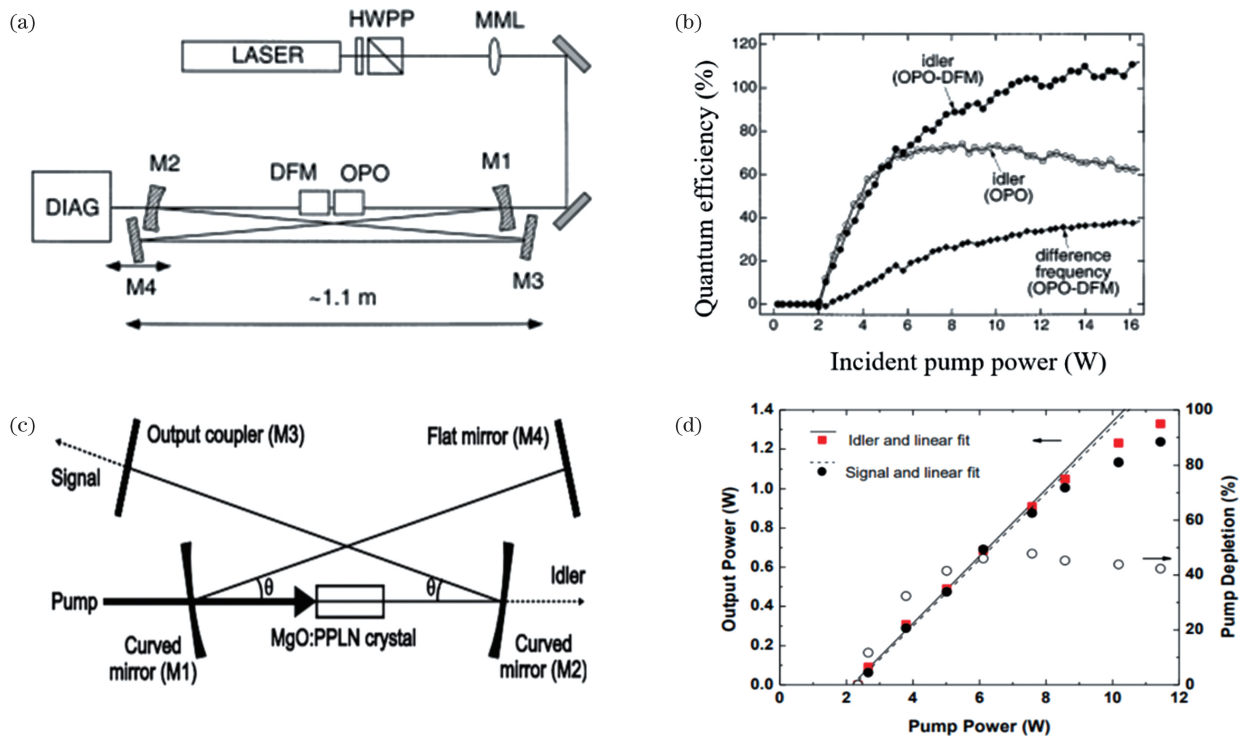


图 8 基于光学超晶格晶体的 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 皮秒中红外 OPO。(a)同步泵浦 OPO 实验示意图和(b)对应的功率输出曲线^[129];
(c)驻波腔同步泵浦 OPO 实验示意图和(d)对应的输出功率曲线^[134]
Fig. 8 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ ps mid-infrared OPO based on optical superlattice crystal. (a) Experimental setup of synchronously-pumped OPO and (b) corresponding output power curves^[129]; (c) experimental setup of synchronously-pumped OPO based on standing-wave cavity and (d) corresponding output power curves^[134]

表 4 基于光学超晶格晶体的 2~5 μm 皮秒中红外 OPO 的主要进展及性能参数

Table 4 Main progress and performance parameters of 2~5 μm ps mid-infrared OPOs based on optical superlattice crystals

Laser style	Pump source		Repetition rate / MHz	Pulse duration / ps	OPO oscillation threshold / mW	Nonlinear crystal	Period / μm	Length / mm	Cavity	Mid-infrared wavelength tuning range / μm	Mid-infrared output power	Ref.
	Output power / W	Wavelength / nm										
Nd : YLF laser	3	1047	105	2.4	940	PPLN	30.5	6	V-shaped cavity	1.670-2.806	90 mW@2.37 μm	[127]
Nd : YLF laser	1	1047	76	4	7.5	PPLN	25.5-31.2	19	—	2.7-5.3	About 20 mW@5.3 μm	[128]
Nd : YAG laser	5.5	1064	76	100	—	PPLN	29.75	12	X-shaped cavity	1.5-3.5	5.7 W@3.5 μm	[129]
Nd : YAG laser	17.7	1064	76	80	980	PPLN	30.95-31.20	47	X-shaped cavity	1.7-2.84	8 W@1.85 μm and 4 W@2.5 μm	[130]
Yb fiber laser	6.4	1064	15.3	7	1.25×10 ³	PPLN	28-31	1	Straight cavity	2.198-4.028	1.09 W@1.535 μm	[139]
Nd : YVO ₄ laser	14.5	1064	160	10	—	PPLN	25.0-31.5	19	Z-type cavity	3-5	1.1 W@4.5 μm	[131]
Nd : YVO ₄ laser	25	1064	80	28	—	PPCLN	30.5	40	V-shaped cavity	1.4-2.1 2.1-4.3	6 W@2.4 μm	[132]
Yb fiber laser	16	1064	81.1	20.8	740	PPLN	28.5-30.5	50	X-shaped cavity	4.16-3.06	7.4 W@1.47 μm and 4.9 W@3.08 μm	[133]
Yb fiber amplifier	24	1064	114.8	21	—	PPLN	26.5-31.5	40	X-shaped cavity	2.9-4.4	7.3 W@1.54 μm and 3.1 W@3.4 μm	[134]
Yb fiber laser	16	1064	81	20	—	PPLN	28.5-31.5	50	X-shaped cavity	3.0-4.0	6.53 W@1.55 μm and 3.05 W@3.39 μm	[140]
Yb fiber amplifier	5.2	1064	52	20	500	PPLN	30.5	50	X-shaped cavity	3.15-3.42	0.67 W@3.42 μm	[141]
Yb fiber-LBO laser	1	530	230	20	—	PPLN	6.7-7.1	20	X-shaped cavity	1.54	107 mW@1.42 μm ¹⁶⁵	[142]
Yb fiber laser	5.6	1064	82	20	—	PPLN	28.5-31.5	50	X-shaped cavity	1.43-1.63	600 mW@1.56 μm	[143]
Yb fiber laser	8	1064	80	20	—	PPLN	28.5-31.5	50	X-shaped cavity	3.12-3.39	0.29 W@3.393 μm	[144]
Yb fiber laser	20	1064	79.4	20	—	PPLN	28	35	X-shaped cavity	2.418-4.307	2.4 W@1.66 μm and 1.7 W@2.95 μm	[135]
Nd : YVO ₄ slab amplifier laser	12	1064	116.9	~40	2.5	PPLN	28-30	22	V-shaped cavity	3.362-4.29	1.05 W@1.519 μm and 1.02 W@3.555 μm	[138]
Nd : YVO ₄ slab amplifier	16	1064	116.9	40	—	PPLN	31	40	X-shaped cavity	2.688-3.016	4.5 W@2.896 μm	[145]
Yb fiber laser	18	1064	79.3	20	—	PPLN	32.16	50	X-shaped cavity	2.1	7.1 W@2.1 μm	[136]
Nd : YVO ₄ laser	20	1064	80	28	—	PPSLT	28.7	40	V-shaped cavity	3.88	1.3 W@1.46 μm	[146]
Yb fiber laser	11	1064	80	20	—	PPLN	28.5-31.5	42	X-shaped cavity	1.46-2.06 and 2.198-4.028	3.5 W@2.19 μm 300 mW@4.028 μm	[137]
Yb fiber laser	12.4	1064	80	20	6	PPLN	32.16	50	X-shaped cavity	2.1	2.8 W@2.1 μm	[147]

5 μm 皮秒中红外 OPO 的主要进展及性能参数。

4 总结与展望

2~5 μm 中红外激光是重要的大气传输窗口,覆盖了多种气体分子的特征吸收峰,并包含多种红外探测器的响应波段,在军事对抗、遥感探测、大气监测、空间光通信、生物工程等领域具有广泛的应用需求。OPO 基于晶体的二阶非线性光学效应,实现了激光频率下转换,是实现高功率中红外激光光源的有效技术途径。非线性光学晶体是 OPO 的关键核心元件,以 PPLN 为代表的光学超晶格晶体具有非线性系数大、波长应用范围宽、作用距离长和使用灵活等特点,并可以通过改变温度和周期来实现宽调谐输出,是目前 2~5 μm 波段高功率宽调谐中红外 OPO 的最佳选择。OPO 的泵浦源可以是连续波激光,也可是纳秒或皮秒脉冲激光,泵浦源参数直接决定了 OPO 的运转模式、振荡阈值、效率、输出功率、光束质量、稳定性以及应用范围。泵浦源可以是半导体激光器、半导体激光泵浦的全固态激光器以及光纤激光器。

基于光学超晶格晶体的 OPO 是产生高功率宽调谐 2~5 μm 中红外激光的有效技术手段。主要总结了近年来连续波、纳秒波和皮秒波运转模式下的光学超晶格 OPO 的研究进展,2~5 μm 高功率宽调谐中红外激光输出已得以实现。纵观国内外 OPO 的发展现状,提高输出功率、光束质量和稳定性以及实现低功耗、小型化和轻量化是基于光学超晶格晶体的 2~5 μm 中红外 OPO 未来发展的必然趋势,展望如下。

1) 大尺寸、高质量光学超晶格晶体是实现高功率 OPO 激光输出的关键。随着晶体生长技术和超晶格制备技术的不断发展,通过制备通光孔径更大(厚度 $>2\text{ mm}$)、质量更高的光学超晶格晶体,并结合高功率的激光泵浦源,可以得到更高功率的中红外 OPO 输出。

2) OPO 与 OPA 结合的技术方案是实现高功率中红外 OPO 运转的有效技术途径。光学超晶格晶体材料本身对长波长中红外激光的吸收会引起热效应,这会导致 OPO 转换效率降低、光束质量恶化、稳定性降低并限制输出功率的提高。采用 OPO+OPA 技术方案,可以在保证光束质量以及稳定性的情况下大大提高中红外激光的输出功率。

3) 窄线宽连续波中红外激光在痕量气体探测和监测方面具有重要应用,可大大提高气体探测的灵

敏度。通过快速调谐泵浦光和锁定信号光,可实现中红外波段闲频光的快速扫频激光输出,闲频光有望在中红外激光气体探测领域实现重要的应用。

4) 设计新型的 OPO 谐振腔及控温和散热结构,缓解超晶格晶体中的热不稳定性,补偿热透镜效应,提高输出功率、光束质量和稳定性是光学超晶格 OPO 未来的研究重点;同时,更紧凑的谐振腔设计易于实现工程化,也是 OPO 未来发展的必然趋势。

5) 针对中红外激光在军事领域的特殊应用需求,半导体激光器和光纤激光器泵浦光学超晶格 OPO 是实现低功率、小型化和轻量化中红外激光光源的重要途径。

参 考 文 献

- [1] Zhong M, Ren G. 3~5 μm medium infrared laser countermeasure weapon system [J]. Sichuan Ordnance Journal, 2007, 28(1): 3-6.
钟鸣, 任钢. 3~5 μm 中红外激光对抗武器系统[J]. 四川兵工学报, 2007, 28(1): 3-6.
- [2] Mahulikar S P, Sonawane H R, Arvind Rao G. Infrared signature studies of aerospace vehicles [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2007, 43(7/8): 218-245.
- [3] Ren G G, Huang Y N. Laser-based IRCM system defenses for military and commercial aircraft [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(1): 1-6.
任国光, 黄裕年. 用激光红外干扰系统保护军用和民航机[J]. 激光与红外, 2006, 36(1): 1-6.
- [4] Godard A. Infrared (2~12 μm) solid-state laser sources: a review [J]. Comptes Rendus Physique, 2007, 8(10): 1100-1128.
- [5] Ebrahim-Zadeh M, Vodopyanov K. Mid-infrared coherent sources and applications: introduction [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(11): MIC1.
- [6] Fang C, Wang S B, Hui Y L, et al. Progress on erbium-doped mid-infrared laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180002.
方聪, 王思博, 惠勇凌, 等. 掺铒中红外激光器的进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180002.
- [7] Ling W J, Sun R, Chen C, et al. Passively Q-switched mode-locked Tm: LuAG laser with reflective MoS₂ saturable absorber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0808002.
令维军, 孙锐, 陈晨, 等. 基于反射式 MoS₂ 可饱和吸收体调 Q 锁模 Tm: LuAG 激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0808002.
- [8] Gebbie H A, Harding W R, Hilsum C, et al.

- Atmospheric transmission in the 1 to 14 μ region[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences, 1951, 206 (1084): 87-107.
- [9] Liu Z Y, Bian J T, Shao L, et al. Progress of mid-infrared laser technology [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 853-858.
刘尊洋, 卞进田, 邵立, 等. 中红外激光技术研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 853-858.
- [10] Arslanov D D, Spunei M, Mandon J, et al. Continuous-wave optical parametric oscillator based infrared spectroscopy for sensitive molecular gas sensing[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7 (2): 188-206.
- [11] Ren G. Studies on the mid-infrared optical parametric oscillators and their applications [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006: 28-36.
任钢. 中红外光参量振荡器及其应用技术的研究[D]. 成都: 四川大学, 2006: 28-36.
- [12] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. Science, 1994, 264 (5158): 553-556.
- [13] Razeghi M, Bandyopadhyay N, Bai Y B, et al. Recent advances in mid infrared (3-5 μ m) Quantum Cascade Lasers[J]. Optical Materials Express, 2013, 3(11): 1872-1884.
- [14] Garbuzov D Z, Lee H, Khalfin V, et al. 2.3-2.7 μ m room temperature CW operation of InGaAsSb-AlGaAsSb broad waveguide SCH-QW diode lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11 (7): 794-796.
- [15] DeLoach L D, Page R H, Wilke G D, et al. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy and laser demonstration of a new class of gain media [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1996, 32(6): 885-895.
- [16] Sorokin E, Naumov S, Sorokina I T. Ultrabroadband infrared solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11 (3): 690-712.
- [17] Rabinovich W S, Bowman S R, Feldman B J, et al. Tunable laser pumped 3 μ m Ho: YAlO₃ laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(4): 895-897.
- [18] Jackson S D. Single-transverse-mode 2.5-W holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.86 μ m[J]. Optics Letters, 2004, 29(4): 334-336.
- [19] Nie H K, Zhang P X, Zhang B T, et al. Diode-end-pumped Ho, Pr: LiLuF₄ bulk laser at 2.95 μ m[J]. Optics Letters, 2017, 42(4): 699-702.
- [20] Zhang B, Yang W Q, Hou J, et al. All-fiber mid-infrared supercontinuum source from 1.9 μ m to 4.3 μ m [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40 (11): 1102013.
张斌, 杨未强, 侯静, 等. 1.9~4.3 μ m 全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2013, 40 (11): 1102013.
- [21] Yin K, Zhang B, Cai Z, et al. Fiber-pumped 2.0-5.5 μ m flat mid-infrared supercontinuous laser source [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (12): 1215001.
殷科, 张斌, 蔡振, 等. 光纤抽运 2.0~5.5 μ m 光谱平坦型中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1215001.
- [22] Wei X B. Study on mid-infrared PPLN optical parametric oscillation technology [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2010: 72-77.
魏星斌. 中红外 PPLN 光参量振荡技术研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2010: 72-77.
- [23] Savage N. Optical parametric oscillators[J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 124-125.
- [24] Yao W M. Study on the continuous wave optical parametric oscillator and coexistent stimulated Raman scattering phenomenon [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2013.
姚文明. 连续波光学参量振荡器及受激拉曼散射现象的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2013.
- [25] Shen D Y, Fan D Y. Mid-infrared lasers [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 172-177.
沈德元, 范滇元. 中红外激光器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 172-177.
- [26] Huang N, The technology and application of optical frequency conversion in the mid-infrared and terahertz band[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
黄楠. 中红外及太赫兹波段的光学频率变换技术及应用[D]. 西安: 中国科学院大学, 2017.
- [27] Shang Y P. High-power fiber lasers pumped mid-infrared optical parametric oscillator[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
尚亚萍. 高功率光纤激光泵浦中红外光学参量振荡器研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
- [28] Ning J. Mid-IR optical parametric oscillator based on optical superlattice[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
宁建. 光学超晶格中红外光参量振荡器研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [29] Chen T. Investigation on the advanced quasi-phase-matching optical parametric oscillators [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 54-59.

- 陈滔. 基于准相位匹配技术的高性能光参量振荡器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 54-59.
- [30] Wu S. Study on 3.8 μm mid-IR optical parametric amplifier based on MgO: PPLN crystal [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
吴爽. 基于 MgO: PPLN 晶体的 3.8 μm 中红外光参量放大器研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [31] Hansson G, Karlsson H, Wang S H, et al. Transmission measurements in KTP and isomorphous compounds [J]. *Applied Optics*, 2000, 39 (27): 5058-5069.
- [32] Bosenberg W R, Cheng L K, Bierlein J D. Optical parametric frequency conversion properties of KTiOAsO_4 (KTA) [C] // *Advanced Solid State Lasers*, February 1, 1993, New Orleans, Louisiana. Washington, D.C.: OSA, 1993: NF12.
- [33] Zhang W, Wan Y, Chen H M, et al. Experimental study on mid-infrared KTA optical parametric oscillator [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(7): 742-746.
张伟, 万勇, 陈鸿鸣, 等. 中红外脉冲 KTA 光参量振荡器实验研究 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(7): 742-746.
- [34] Vodopyanov K L, Ganikhanov F, Maffetone J P, et al. ZnGeP_2 optical parametric oscillator with 3.8–12.4 μm tunability [J]. *Optics Letters*, 2000, 25 (11): 841-843.
- [35] Haidar S, Miyamoto K, Ito H. Generation of tunable mid-IR (5.5–9.3 μm) from a 2 μm pumped ZnGeP_2 optical parametric oscillator [J]. *Optics Communications*, 2004, 241(1/2/3): 173-178.
- [36] Li C, Xie J J, Pan Q K, et al. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 615-624.
李充, 谢冀江, 潘其坤, 等. 中红外光学参量振荡器技术进展 [J]. *中国光学*, 2016, 9(6): 615-624.
- [37] Nikogosyan D N. Nonlinear optics crystals (review and summary of data) [J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1977, 7(1): 1-13.
- [38] Jia N, Wang S P, Tao X T. Research progress of mid- and far-infrared nonlinear optical crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(24): 244203.
贾宁, 王善朋, 陶绪堂. 中远红外非线性光学晶体研究进展 [J]. *物理学报*, 2018, 67(24): 244203.
- [39] Russell D A, Ebert R. Efficient generation and heterodyne detection of 4.75 μm light with second-harmonic generation [J]. *Applied Optics*, 1993, 32 (33): 6638-6644.
- [40] Lin X S, Zhang G, Ye N. Growth and characterization of BaGa_4S_7 : a new crystal for mid-IR nonlinear optics [J]. *Crystal Growth & Design*, 2009, 9(2): 1186-1189.
- [41] Tyazhev A, Kolker D, Marchev G, et al. Midinfrared optical parametric oscillator based on the wide-bandgap BaGa_4S_7 nonlinear crystal [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4146-4148.
- [42] Zhao B R, Chen Y, Yao B Q, et al. High-efficiency, tunable 8–9 μm BaGa_4Se_7 optical parametric oscillator pumped at 2.1 μm [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 11(8): 3332-3337.
- [43] Wang Z Y, Wu H X. Research progress of nonlinear crystals for 8–12 μm long-wave IR generation [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2019, 48(1): 34-46, 53.
王振友, 吴海信. 8~12 μm 长波红外非线性晶体研究进展 [J]. *人工晶体学报*, 2019, 48(1): 34-46, 53.
- [44] Knippels G M H, van der Meer A F G, MacLeod A M, et al. Mid-infrared (2.75–6.0 μm) second-harmonic generation in LiInS_2 [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(9): 617-619.
- [45] Dai S B, Jia N, Chen J K, et al. Picosecond mid-infrared optical parametric amplifier based on LiInSe_2 with tenability extending from 3.6 to 4.8 μm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12860-12866.
- [46] Jia N. Study on the single crystal growth and properties of LiInSe_2 [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
贾宁. LiInSe_2 单晶的生长与性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [47] Zhang G D, Wang S P, Tao X T. Research progress of infrared nonlinear optical crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2012, 41(S1): 17-23.
张国栋, 王善朋, 陶绪堂. 红外非线性光学晶体研究进展 [J]. *人工晶体学报*, 2012, 41(S1): 17-23.
- [48] Tiuhonen M, Pasiskevicius V, Laurell F. Spectral and spatial limiting in idler-resonant optical parametric oscillator with PPKTP [C] // *Advanced Solid-State Photonics 2004*, February 1-4, 2004, Santa Fe, New Mexico, United States. Washington, D.C.: OSA, 2004: 456.
- [49] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J, et al. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. *Physical Review*, 1962, 127(6): 1918-1939.
- [50] Li G. Transformation and expansion of laser frequency [M]. Beijing: Science Press, 2005: 137.
李港. 激光频率的变换与扩展 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 137.
- [51] Kroll N M. Parametric amplification in spatially extended media and application to the design of tuneable oscillators at optical frequencies [J].

- Proceedings of the IEEE, 1963, 51(1): 110-114.
- [52] Giordmaine J A, Miller R C. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO₃ at optical frequencies [J]. Physical Review Letters, 1965, 14(24): 973.
- [53] Yamada M, Nada N, Saitoh M, et al. First-order quasi-phase matched LiNbO₃ waveguide periodically poled by applying an external field for efficient blue second-harmonic generation [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(5): 435-436.
- [54] Myers L E, Eckardt R C, Fejer M M, et al. Quasi-phases-matched optical parametric oscillators using bulk periodically poled LiNbO₃ [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2379: 154-162.
- [55] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I, et al. Continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled LiNbO₃ [J]. Optics Letters, 1996, 21(10): 713-715.
- [56] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I, et al. 93% pump depletion, 3.5 W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 1996, 21(17): 1336-1338.
- [57] Stothard D J M, Ebrahimzadeh M, Dunn M H. Low-pump-threshold continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 1998, 23(24): 1895-1897.
- [58] Stothard D J M, Fortin P, Carleton A, et al. Comparison of continuous-wave optical parametric oscillators based on periodically poled LiNbO₃ and periodically poled RbTiOAsO₄ pumped internal to a high-power Nd : YVO₄ laser [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 20(10): 2102-2108.
- [59] Ding X, Zhang S M, Ma H M, et al. Continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. Chinese Physics B, 2008, 17(1): 211-216.
- [60] Yan B X, Bi Y, Zhou M, et al. Highly efficient continuous-wave mid-infrared intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on MgO: PPLN [J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(12): 124203.
- [61] Tan H M, Lin H Y, Zhang B L. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(9): 2303-2308.
- 檀慧明, 林洪沂, 张搏麟. 基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器 [J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2303-2308.
- [62] Lindsay I D, Petridis C, Dunn M H, et al. Continuous-wave pump-enhanced singly resonant optical parametric oscillator pumped by an extended-cavity diode laser [J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(7): 871-873.
- [63] Klein M E, Lee D H, Meyn J P, et al. Singly resonant continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a diode laser [J]. Optics Letters, 1999, 24(16): 1142-1144.
- [64] Stothard D J, Hopkins J M, Burns D, et al. Stable, continuous-wave, intracavity, optical parametric oscillator pumped by a semiconductor disk laser (VECSEL) [J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10648-10658.
- [65] Nieuwenhuis A F, Lee C J, Sumpf B, et al. One-Watt level mid-IR output, singly resonant, continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a monolithic diode laser [J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11123-11131.
- [66] Gross P, Klein M E, Walde T, et al. Fiber-laser-pumped continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 2002, 27(6): 418-420.
- [67] van Herpen M, Te Lintel Hekkert S, Bisson S E, et al. Wide single-mode tuning of a 3.0-3.8 μm, 700-mW, continuous-wave Nd : YAG-pumped optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. Optics Letters, 2002, 27(8): 640-642.
- [68] Klein M E, Gross P, Boller K J, et al. Rapidly tunable continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a fiber laser [J]. Optics Letters, 2003, 28(11): 920-922.
- [69] van Herpen M M J W, Bisson S E, Ngai A K Y, et al. Combined wide pump tuning and high power of a continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator [J]. Applied Physics B, 2004, 78(3/4): 281-286.
- [70] Chen D W, Rose T S. Low noise 10-W CW OPO generation near 3 μm with MgO doped PPLN [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 22-27, 2005, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE, 2005: 1829-1831.
- [71] Henderson A, Stafford R. Low threshold, singly-resonant CW OPO pumped by an all-fiber pump source [J]. Optics Express, 2006, 14(2): 767-772.
- [72] Vainio M, Peltola J, Persijn S, et al. Singly resonant cw OPO with simple wavelength tuning [J]. Optics Express, 2008, 16(15): 11141-11146.
- [73] Vainio M, Siltanen M, Peltola J, et al. Continuous-wave optical parametric oscillator tuned by a diffraction grating [J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7702-7707.

- [74] Zhao J Q, Yao B Q, Tian Y, et al. High power, continuous wave, singly resonant OPO based on MgO: PPLN [J]. *Laser Physics*, 2010, 20(10): 1902-1906.
- [75] Peng Y F, Wei X B, Wang W M, et al. High-power 3.8 μm tunable optical parametric oscillator based on PPMgO:CLN [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(20): 4032-4035.
- [76] Henderson A, Tankala K, Esquinasi P. 23-watt 77% efficient CW OPO pumped by a fiber laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580:75800D.
- [77] Powers P E, Kulp T J, Bisson S E. Continuous tuning of a continuous-wave periodically poled lithium niobate optical parametric oscillator by use of a fan-out grating design [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(3): 159-161.
- [78] Zhao J Q. Study on mid-infrared continuous wave optical parametric oscillator technique based on MgO: PPLN crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 137.
赵家群. 基于 MgO:PPLN 的中红外连续波光学参量振荡器技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 137.
- [79] Chaitanya Kumar S, Ebrahim-Zadeh M. High-power, continuous-wave, mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO: SPPLT [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2578-2580.
- [80] Devi K, Kumar S C, Esteban-Martin A, et al. Antiresonant ring output-coupled continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19313-19321.
- [81] Lin S T, Lin Y Y, Huang Y C, et al. Continuous-wave, singly resonant OPO at 3 μm [EB/OL]. (2008-04-15) [2020-08-10]. https://www.researchgate.net/profile/J-T_Shy/publication/1915169_Continuous-wave_singly_resonant_OPO_at_3_m_m/links/0fcfd50880f22c7cd1000000/Continuous-wave-singly-resonant-OPO-at-3-m-m.pdf?origin=publication_detail.
- [82] Liu L. Research of fiber laser pumped continuous-wave optical parametric oscillator [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 16-23.
刘磊. 光纤激光泵浦的连续波光学参量振荡器研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 16-23.
- [83] Yao W M, Tan H M, Tian Y B, et al. Continuously broad-band tunable all-solid-state CW optical parametric oscillator based on PPMgLN [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(8): 2021-2026.
姚文明, 檀慧明, 田玉冰, 等. 宽波段连续调谐全固态 CW PPMgLN 光学参量振荡器 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(8): 2021-2026.
- [84] Xu X J, Li X, Shang Y P, et al. Fiber laser pumped 34.2 W continuous-wave mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0809002.
许晓军, 李霄, 尚亚萍, 等. 光纤激光抽运 34.2 W 连续波中红外光学参量振荡器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0809002.
- [85] Lin H Y, Huang X H, Xu Y C, et al. Mid-infrared, wide-tunable, continuous-wave Nd: YVO₄/PPMgLN intracavity optical parametric oscillator [J]. *Optik*, 2014, 125(23): 6969-6971.
- [86] Zeil P, Thilmann N, Pasiskevicius V, et al. High-power, single-frequency, continuous-wave optical parametric oscillator employing a variable reflectivity volume Bragg grating [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29907-29913.
- [87] Ricciardi I, Mosca S, Parisi M, et al. Sub-kHz-linewidth mid-infrared optical parametric oscillator [C] // 2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) - Laser Science to Photonic Applications, June 8-13, 2014, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2014: 14846534.
- [88] Shang Y P, Wang P, Li X, et al. Frequency down-conversion of a dual-wavelength fiber laser [J]. *Optik*, 2016, 127(24): 11871-11876.
- [89] Zhang J, Zhang Y C, Duan Y M, et al. Mid-infrared tunable intracavity singly resonant optical parametric oscillator based on MgO: PPLN [J]. *International Journal of Optics*, 2017, 2017: 1-5.
- [90] Li Y X, Li S F, Ju P P, et al. Highly stable compact intra-cavity continuous-wave optical parametric oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0406004.
李宇昕, 李世凤, 居盼盼, 等. 高稳定紧凑型内腔连续光参量振荡器 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 0406004.
- [91] Barria J B, Roux S, Dherbecourt J B, et al. Microsecond fiber laser pumped, single-frequency optical parametric oscillator for trace gas detection [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2165-2167.
- [92] Wei P F, Zhang Y C, Zhang J, et al. Efficient continuous-wave MgO: PPLN optical parametric oscillator with three-mirror linear cavity [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(1): 45-50.
尉鹏飞, 张永昶, 张静, 等. 三镜直腔结构 MgO: PPLN 高效连续光参量振荡器 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 45-50.
- [93] Peng Y F, Wei X B, Nie Z, et al. High-power, narrow-bandwidth mid-infrared PPMgLN optical

- parametric oscillator with a volume Bragg grating[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 30827-30832.
- [94] Bosenberg W R, Drobshoff A, Myers L E. High-power, high-repetition-rate optical parametric oscillator based on periodically-poled LiNbO₃ [C] // Advanced Solid State Lasers 1996, January 31, 1996, San Francisco, California. Washington, D. C.: OSA, 1996: QM1.
- [95] Myers L E, Bosenberg W R. Periodically poled lithium niobate and quasi-phase-matched optical parametric oscillators[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1997, 33(10): 1663-1672.
- [96] Th Bekman H H P, van den Heuvel J C, van Putten F J M, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5615: 27-38.
- [97] Zhang X B, Yao B Q, Ju Y L, et al. A 2.048- μm Tm, Ho: GdVO₄ laser pumped doubly resonant optical parametric oscillator based on periodically poled lithium LiNbO₃ [J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(7): 1953-1954.
- [98] Alam S U, Chen K K, Lin D J, et al. Externally modulated diode-seeded Yb³⁺-doped fiber MOPA pumped high power optical parametric oscillator[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7197: 71970H.
- [99] Peng Y F, Wang W M, Xie G, et al. 3.8 μm mid-infrared laser with 11.2 W output power[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S3): 82-85.
彭跃峰, 王卫民, 谢刚, 等. 11.2 W 中红外 3.8 μm 激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S3): 82-85.
- [100] Wei X B, Peng Y F, Wang W M, et al. Wavelength tunability of tandem optical parametric oscillator based on single PPMgOLN crystal [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(11): 1061-1063.
- [101] Wu B, Kong J, Shen Y. High-efficiency semi-external-cavity-structured periodically poled MgLN-based optical parametric oscillator with output power exceeding 9.2 W at 3.82 μm [J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1118-1120.
- [102] Hardy B, Berrou A, Guilbaud S, et al. Compact, single-frequency, doubly resonant optical parametric oscillator pumped in an achromatic phase-adapted double-pass geometry [J]. Optics Letters, 2011, 36(5): 678-680.
- [103] Lin D, Alam S U, Shen Y, et al. Large aperture PPMgLN based high-power optical parametric oscillator at 3.8 μm pumped by a nanosecond linearly polarized fiber MOPA[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15008-15014.
- [104] Ishizuki H, Taira T. Half-joule output optical-parametric oscillation by using 10-mm-thick periodically poled Mg-doped congruent LiNbO₃ [J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20002-20010.
- [105] Wu B, Chen T, Wang J, et al. Fiber laser-pumped, chirped, PPMgLN-based high efficient broadband mid-IR generation [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(8): 081901.
- [106] Peng Y F, Wei X B, Li D M, et al. High-power mid-infrared tunable optical parametric oscillator based on 3-mm-thick PPMgCLN[J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 87-90.
- [107] Zhao G, Jiang X D, Lü X J, et al. Four-wavelength near and mid-infrared optical parameter oscillator based on superlattice[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502004.
赵刚, 蒋旭东, 吕新杰, 等. 基于光学超晶格的四波长近-中红外光参量振荡器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502004.
- [108] Peng Y, Wei X, Luo X, et al. High-power and widely tunable mid-infrared optical parametric amplification based on PPMgLN [J]. Optics Letters, 2016, 41(1): 49-51.
- [109] Elder I F, Terry J C. Efficient conversion into the near- and mid-infrared using a PPLN OPO [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2000, 2(3): L19-L23.
- [110] Smith D E, Bowers M S, Schunemann P G. Multiwavelength mid-infrared zinc germanium phosphide and PPLN optical parametric oscillator [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4972: 78-81.
- [111] Ding X, Zou L, Wen W Q, et al. All-solid-state quasi-continuous-wave tunable Ti: sapphire laser and pump-tuning PPLN-OPO [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5646: 400-403.
- [112] Kolker D B, Starikova M K, Pustovalova R V, et al. A nanosecond optical parametric oscillator in the mid-IR region with double-pass pump [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2012, 55(2): 263-267.
- [113] Ghavami Sabouri S, Khorsandi A. Optical parametric oscillator pumped by relaxation oscillation pulses of a mechanically Q-switched Nd: YAG laser[J]. Applied Physics B, 2013, 110(3): 425-431.
- [114] Xu L, Zhang S Y, Chen W B. Tm: YLF laser-pumped periodically poled MgO-doped congruent LiNbO₃ crystal optical parametric oscillators [J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 743-745.
- [115] Yu Y, Chen X, Zhao J, et al. High-repetition-rate tunable mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO: periodically poled lithium niobate [J]. Optical Engineering, 2013, 53(6): 061604.

- [116] Yu Y J, Zhai R Z, Zhao J, et al. Widely tunable mid-infrared optical parametric oscillator based on a multiple periods MgO: PPLN [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9295: 92950W.
- [117] Liu S D, Wang Z W, Zhang B T, et al. Wildly tunable, high-efficiency MgO: PPLN mid-IR optical parametric oscillator pumped by a Yb-fiber laser [J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(2): 024204.
- [118] Guo J, He G Y, Zhang B F, et al. Compact efficient 2.1 μm intracavity MgO: PPLN OPO with a VBG output coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(6): 573-576.
- [119] Li H S, Liu Z Z, Zheng J K, et al. High power mid-infrared MgO : PPLN optical parametric oscillator [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2015, 13(1): 64-67.
李海速, 刘在洲, 郑建奎, 等. 高功率中红外 MgO : PPLN 光参量振荡器 [J]. 光学与光电技术, 2015, 13(1): 64-67.
- [120] Antipov O, Kositsyn R, Kal' Yanov D, et al. 3.9 μm optical parametric oscillator based on MgO : PPLN pumped at 1966 nm using a high-repetition-rate Tm³⁺ : Lu₂O₃ ceramic laser [C]//The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2017, June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE, 2017: CD_P_50.
- [121] Xing T L, Wang L, Hu S W, et al. Cavity-linewidth narrowing of 3 μm low threshold MgO : PPLN-OPO by volume Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 192-197.
邢廷伦, 王礼, 胡舒武, 等. 3 μm 低阈值 MgO : PPLN-OPO 布拉格体光栅腔谱宽压窄研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(1): 192-197.
- [122] Nandy B, Chaitanya Kumar S, Canals Casals J, et al. Tunable high-average-power optical parametric oscillators near 2 μm [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2018, 35(12): C57.
- [123] Wang Y H, Liu H Y, Wang Z Y, et al. 4.1 μm high power mid-infrared intra-cavity optical parametric oscillator [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(8): 0823002.
王宇恒, 刘贺言, 王泽宇, 等. 4.1 μm 高功率中红外内腔光参量振荡器 [J]. 光子学报, 2019, 48(8): 0823002.
- [124] Kumar S C, Ebrahim-Zadeh M. Green-pumped optical parametric oscillator based on fan-out grating periodically-poled MgO-doped congruent LiTaO₃ [J]. Optics Letters, 2019, 44(23): 5796-5799.
- [125] Li D, Yu Y J, Li Y, et al. Narrow linewidth 2.1 μm optical parametric oscillator with intra-cavity configuration based on wavelength-locked 878.6 nm in-band pumping [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 131:106412.
- [126] Guo L, Yang Y, Zhao S, et al. Room temperature watt-level 3.87 μm MgO: PPLN optical parametric oscillator under pumping with a Tm: YAP laser [J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32916-32924.
- [127] Butterworth S D, Pruneri V, Hanna D C. Optical parametric oscillation in periodically poled lithium niobate based on continuous-wave synchronous pumping at 1.047 μm [J]. Optics Letters, 1996, 21(17): 1345-1347.
- [128] Lefort L, Puech K, Butterworth S D, et al. Efficient, low-threshold synchronously-pumped parametric oscillation in periodically-poled lithium niobate over the 1.3 μm to 5.3 μm range [J]. Optics Communications, 1998, 152(1/2/3):55-58.
- [129] Dearborn M E, Koch K, Moore G T, et al. Greater than 100% photon-conversion efficiency from an optical parametric oscillator with intracavity difference-frequency mixing [J]. Optics Letters, 1998, 23(10): 759-761.
- [130] Hoyt C W, Sheik-Bahae M, Ebrahimzadeh M. High-power picosecond optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate [J]. Optics Letters, 2002, 27(17): 1543-1545.
- [131] Ruebel F, Anstett G, L'huillier J A. Synchronously pumped mid-infrared optical parametric oscillator with an output power exceeding 1 W at 4.5 μm [J]. Applied Physics B, 2011, 102(4): 751-755.
- [132] Zhao G, Ju P P, Lu X J, et al. Tunable pico-second optical parametric lasers based on optical superlattice [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2014, 20(2): 172-176.
赵刚, 居盼盼, 吕新杰, 等. 基于光学超晶格的皮秒光参量可调谐激光器 [J]. 量子光学学报, 2014, 20(2): 172-176.
- [133] Kokabee O, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M. Efficient, high-power, ytterbium-fiber-laser-pumped picosecond optical parametric oscillator [J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3210-3212.
- [134] Kienle F, Chen K K, Alam S U, et al. High-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode [J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7602-7610.
- [135] Chaitanya Kumar S, Wei J, Debray J, et al. High-power, widely tunable, room-temperature picosecond optical parametric oscillator based on cylindrical 5% MgO: PPLN [J]. Optics Letters, 2015, 40(16): 3897-3900.
- [136] Chaitanya Kumar S, Ebrahim-Zadeh M. Yb-fiber-

- based, high-average-power, high-repetition-rate, picosecond source at $2.1 \mu\text{m}$ [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 970-977.
- [137] Parsa S, Chaitanya Kumar S, Nandy B, et al. Yb-fiber-pumped, high-beam-quality, idler-resonant mid-infrared picosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25436-25444.
- [138] Han K Z, Li J, Ning J, et al. Broadly tunable MgO: PPLN mid-infrared OPO synchronously pumped by Innoslaba amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(12): 121005.
- [139] Lamour T P, Kornaszewski L, Sun J H, et al. Yb: fiber-laser-pumped high-energy picosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 14229-14234.
- [140] Kokabee O, Esteban-Martin A, Ebrahim-Zadeh M. High-power, fiber-laser-pumped picosecond optical parametric oscillator for the near- to mid-infrared [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 2010, May 16-21, 2010, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2010: CThY1.
- [141] Liu T, Wang X B, Liu L, et al. Mid-infrared synchronously pumped picosecond optical parametric oscillator based on PPMgLN crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(12): 1202003 .
刘通, 汪晓波, 刘磊, 等. 基于周期极化掺镁铌酸锂晶体的中红外同步抽运皮秒光参量振荡器 [J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1202003 .
- [142] Kienle F, Lin D J, Alam S U, et al. Green-pumped, picosecond MgO: PPLN optical parametric oscillator [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 29(1): 144-152.
- [143] Kimmelma O, Chaitanya Kumar S, Esteban-Martin A, et al. Multi-gigahertz picosecond optical parametric oscillator pumped by 80-MHz Yb-fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4550-4553.
- [144] Ramaiah-Badarla V, Chaitanya Kumar S, Ebrahim-Zadeh M. Fiber-laser-pumped, dual-wavelength, picosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2739-2742.
- [145] Han K Z, Ning J, He J L, et al. High-efficiency mid-infrared picosecond MgO: PPLN single resonant optical parametric oscillator [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(5): 054203.
- [146] Li S, Ju P, Liu Y, et al. Efficiency-enhanced picosecond mid-infrared optical parametric downconversion based on a cascaded optical superlattice [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(4): 041402.
- [147] Nandy B, Chaitanya Kumar S, Ebrahim-Zadeh M. Phase-locked picosecond optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 3981-3984.

Recent Progress of Optical-Superlattice-Based Mid-Infrared Optical Parametric Oscillators

Nie Hongkun¹, Ning Jian², Zhang Baitao^{1*}, Yang Kejian¹, Zhao Gang²,
Lü Xinjie², He Jingliang¹

¹ *State Key Laboratory of Crystal Materials, Institute of Novel Semiconductors, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China;*

² *National Laboratory of Solid State Microstructures, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China*

Abstract

Significance A 2–5 μm mid-infrared (MIR) laser has a broad application prospect and plays a significant role in applications such as remote sensing detection, atmospheric environmental monitoring, medical diagnosis, precision measurement, and photoelectric countermeasures. It covers the so-called “atmospheric window area”, that is, a transmission window with the maximum atmospheric transmittance. It has a strong penetrating ability for fog, smoke, and dust. Moreover, it has been widely used in the field of free-space optical communications. The spectral response range of infrared-guided missile detectors used in military applications is in the 2–5 μm band. As the applications of infrared detectors increase, the development of the corresponding interference technologies increases. A laser light source with a 2–5 μm band for photoelectric countermeasures against infrared seekers is urgently needed. The 2–5 μm band is also called the “molecular fingerprint area”, which covers most gas molecular absorption spectra. It finds important applications in the fields of air pollution monitoring, trace gas detection, precision spectral analysis, and molecular biomedicine. In addition, a 2–5 μm ultrastrong and ultrashort MIR laser can generate high-order harmonics, high-contrast attosecond light pulses, MIR frequency combs, and realize high

brightness. It can also be used as an optical parametric oscillator (OPO) pump source for obtaining a 6–8 μm or even longer wavelength MIR laser. Therefore, because of the important application background and huge market demand of 2–5 μm MIR lasers, they have always been a desired topic of research in the field of all-solid-state laser technology.

Periodically-polarized optical superlattice crystals mainly consist of periodically-polarized lithium niobate (PPLN), periodically-polarized lithium tantalate, and periodically-polarized KTP. They possess the advantages of a large nonlinear coefficient, a wide tuning range, diversified wavelength tuning methods, and a compact structure. When applied to a MIR OPO, they can realize wide tuning, narrow linewidths, and high-power MIR lasers. An OPO based on an optical superlattice crystal is the most efficient way to generate MIR laser sources operating within the 2–5 μm wavelength range. We review the recent progress of optical-superlattice-based OPOs operating within the 2–5 μm wavelength band and analyse the structural features, advantages, and development prospects of OPOs operating in the continuous-wave, nanosecond, and picosecond regimes. The development tendency of optical-superlattice-based OPOs is also highlighted, indicating that high power, wide tunability, low power consumption, small size, and light weight are important development directions. Moreover, the optical superlattice crystals with high quality and large size, pump sources with better performances, and a reliable engineering designation are the key techniques for future development.

Progress The PPLN crystal was first prepared by applying the electric field polarization technique in 1993 by Yamada et al. In 1995, Myers et al. developed the room-temperature electric field polarization technique and effectively improved the size and quality of optical superlattice crystals. They realized the effective operation of a PPLN-based single-resonant OPO for the first time. Moreover, they obtained a tunable laser output ranging from 1.66 μm to 2.95 μm , which greatly promoted the development of the nonlinear frequency conversion technology, especially OPOs. At that point, the OPO based on optical superlattice crystals began to appear on the stage of history and shine. Operating mode of an OPO is determined by pump light, including a continuous-wave (CW) nanosecond, picosecond, and femtosecond. The current study introduces the research progress of the 2–5 μm MIR OPO based on optical superlattice crystals in a CW, nanosecond, and picosecond operation regime.

CW widely-tunable 2–5 μm MIR lasers have important applications in precision spectral analysis, optical sensing and detection, gas monitoring, free-space optical communications, and photoelectric countermeasures. Compared with other nonlinear optical crystals, optical-superlattice-based CW OPOs can not only effectively reduce the threshold, but also enhance the conversion efficiency and MIR output power. So far, the maximum output power, the narrowest linewidth of an optical-superlattice-based CW OPO is 71.6 W@2.907 μm and 1 kHz@2.7–4.2 μm . He et al. applied high-power single-frequency (linewidth of about 20 kHz) all-solid-state laser operation at 1064.2 nm as the pump source, and realized a broad tunable (1344.6–5103.2 nm), narrow-wavelength (~ 10 MHz) CW laser with a four-mirror ring cavity based on two PPLN crystals with periods from 25.5 μm to 32.0 μm and a period interval of 0.5 μm .

Compared with CW lasers, nanosecond pulsed lasers have much higher peak power and are easy to help achieve high-efficiency nonlinear frequency conversion. It is also the most widely studied operation mode since the invention of OPOs. Until now, the maximum output power and the widest tunable range of optical-superlattice-based nanosecond OPOs is 74.6 W@2.68 μm and 2128.6–5076.8 nm. He et al. used a high-power nanosecond 1064-nm laser as a pump source and a PPLN crystal with a thickness of 2 mm, a length of 50 mm, and a period of 32.0 μm . They achieved high-power and high-efficiency degeneracy point OPO with the output power of 33.3 W under the pump power of 60.9 W. The power instability RMS and the light-to-light conversion efficiency are 0.5% and 54.7%, respectively. The beam quality in the horizontal and vertical directions are 1.45 and 1.62, respectively. Using two multi-period PPLN crystals, 2–5 μm wide-tunable MIR OPO with a wavelength range from 2128.6 nm to 5076.8 nm was demonstrated using a nanosecond fiber laser as the pump source.

The 2–5 μm wide-tunable MIR picosecond laser has broad application prospects in laser ranging, Lidar, atomic and molecular dynamics, and time-domain spectroscopy. Compared with CW and nanosecond OPOs, picosecond OPOs need a synchronous pumping mechanism, which requires a fairly precise match of a pump pulse repetition rate and the round-trip frequency of an OPO resonator. Thus far, for the maximum output power of 7.1 W@2.1 μm , the widest tunable range of an optical-superlattice-based picosecond OPO is 2.7–5.3 μm . He et al. used a hybrid-slab amplifier to obtain a high-power picosecond laser with an idle frequency optical tuning range of 3362–4290 nm.

Conclusions and Prospects An OPO based on an optical superlattice crystal is the most efficient way to generate

MIR laser sources operating within the 2–5 μm wavelength range. In this study, we mainly review the recent progress of optical-superlattice-based OPOs operating within the 2–5 μm wavelength band. We analyze the structural features, advantages and development prospects of OPOs operating in the CW, nanosecond, and picosecond regimes. The development tendency of optical-superlattice-based OPOs is also highlighted, indicating that high power, wide tunability, low power consumption, small size, and light weight are important development directions. Moreover, the optical superlattice crystals with high quality and large size, pump sources with better performances, and a reliable engineering designation are the key techniques for future development.

Key words laser optics; optical superlattice; optical parametric oscillator; mid-infrared (MIR) lasers

OCIS codes 140.3070;260.1180; 190.4970