

基于光纤激光器的中红外差频多波长激光产生*

蒋 建 常建华 冯素娟 毛庆和†

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽省光子器件与材料重点实验室, 合肥 230031)

(2009 年 11 月 9 日收到; 2010 年 1 月 30 日收到修改稿)

针对由 YDFL 和 EDFL 作为基频光源的 QPM-DFG 激光系统, 利用 PPMgLN 晶体的色散关系及其温度特性, 有效拓宽了 QPM 波长接受带宽. 模拟结果表明, 当采用 1550 和 1060 nm 波段的 EDFL 和 YDFL 分别作为 DFG 的信号和抽运光源时, 对于相同的中红外波段, 满足 QPM 条件所允许的抽运光波长变化范围远大于信号光波长变化范围. 当固定信号光波长为 1560 nm 时, 对于给定的晶体温度, 1060 nm 波段抽运光的 QPM 接受带宽超过 17 nm, 对应于中红外差频光带宽可约 180 nm. 采用多波长 YDFL 作为抽运源, 单波长 EDFL 后接 EDFA 作为信号源, 在保持 PPMgLN 晶体温度和极化周期 73.5 °C 和 30 μm 不变的前提下, 实验获得了波长间隔为 14 nm 的 14 个中红外激光波长的同时输出, 并且, 改变信号光波长, 可实现对这种中红外多波长激光的同步调谐.

关键词: 差频产生, 准相位匹配, 多波长中红外, 光纤激光器

PACC: 4265K, 4255N, 7830G

1. 引 言

中红外光源在传感与探测、激光光谱学等领域具有重要应用^[1-5]. 近年来, 为满足多组分气体或单组分多谱线同步实时检测需求, 多波长中红外激光器正成为新的研究热点. 2002 年, Straub 等人^[6]通过对分布反馈量子级联激光器结构的特殊设计, 实现了 5.0 和 7.5 μm 双波长中红外输出, 但因激光器需低温工作, 且波长间隔大、输出波长数少, 不利于实际应用. 为获得更多波长的中红外激光输出, Asobe 等人^[7]于 2007 年以多波长 DFB 阵列作为基频光源, 利用周期极化铌酸锂波导 (PPLN), 采用准相位匹配的差频产生 (QPM-DFG) 技术, 实现了三波长的中红外激光输出, 并应用于多组分气体的同步检测. 这表明, 利用多波长基频激光光源、通过 QPM-DFG 技术可产生多波长的中红外激光辐射. 但是, 在利用 DFG 获得多波长中红外激光时, 非线性晶体应具有较大的 QPM 接受带宽, 而通常 PPLN 晶体的典型接受带宽仅约 1—10 cm⁻¹, 因此, 必须拓宽非线性晶体的接受带宽. 迄今, 人们相继提出了啁啾结构^[8]、相位调制^[9]、温度梯度控制^[10]等方法设计所需 QPM 曲线, 特别是, 通

过利用周期极化铌酸锂晶体 (PPLN) 的色散特性, 分别在 2 和 4 μm 附近获得了 100 cm⁻¹ 以上的 QPM 接受带宽^[11,12]. 另一方面, 稀土掺杂光纤激光器具有增益谱宽、光束质量好、功率易提升等优点, 以其为基频光源构建 DFG 的中红外系统受到越来越多的重视^[13]. 本文研究以掺镱光纤激光器 (YDFL) 和掺铒光纤激光器 (EDFL) 为基频光源的 QPM-DFG 中红外激光系统的多波长工作特性. 利用稀土掺杂光纤的宽带增益特性, 并通过周期极化掺铌酸锂晶体 (PPMgLN) 晶体色散特性拓宽其在 3.4 μm 附近的 QPM 接受带宽, 优化 YDFL 和 EDFL 的运转方式, 由等周期的 PPMgLN, 在保持晶体温度不变的前提下, 实现了多达 14 个波长的中红外激光输出.

2. QPM 接受带宽拓展

若假设基频光为高斯光束, 则差频光输出功率 P_i 正比于 $\text{sinc}^2(\Delta kL/2)$ ^[14], 其中 Δk 为相位失谐量, L 为晶体长度. 若定义相位失谐半高全宽 (Δk_{FWHM}) 为满足 $\text{sinc}^2(\Delta kL/2) = 1/2$ 时所对应的相位失谐量, 则有 $\Delta k_{\text{FWHM}} = 0.8858\pi/L$. 当 $|\Delta k| \leq |\Delta k_{\text{FWHM}}|$ 时, DFG 过程满足 QPM 条件, 此时, 定义 QPM 接受带宽为满足 $|\Delta k| \leq |\Delta k_{\text{FWHM}}|$ 时的波

* 国家自然科学基金 (批准号: 60677050), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB936603) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn

长范围.

另一方面,相位失谐量可写为

$$\Delta k = 2\pi(n_p/\lambda_p - n_s/\lambda_s - n_i/\lambda_i - 1/\Lambda), \quad (1)$$

式中 Λ 为周期极化晶体周期, $\lambda_{p,s,i}$ 和 $n_{p,s,i}$ 分别为抽运、信号和差频光的波长和折射率. 通常, $n_{p,s,i}$ 是温度与波长的函数, 可由塞涅尔方程 (Sellmeier equation) 确定^[15]. 于是, QPM 条件可由下式给出:

$$|2\pi(n_p/\lambda_p - n_s/\lambda_s - n_i/\lambda_i - 1/\Lambda)| \leq 0.8858\pi/L, \quad (2)$$

这样, 利用(2)式就可模拟出由 YDFL 和 EDFL 分别作为抽运和信号光源经 QPM-DFG 产生 3.4 μm 附近中红外差频光时的相位失谐特性.

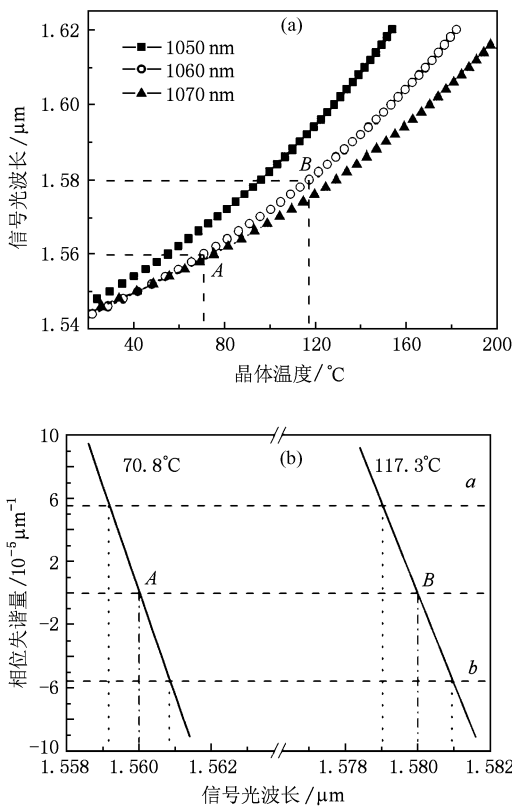


图1 数值模拟结果 (a) 给定抽运光波长下信号光波长与最佳准相位匹配温度间关系;(b) 当抽运光波长为 1060 nm 时, 给定晶体温度下信号光波长变化时的相位失谐特性

图 1(a) 为给定抽运光波长, 信号光波长与相应的最佳准相位匹配温度间关系的模拟结果, 模拟计算时, 晶体长度取 50mm. 由图可见, 对于给定的抽运光波长, 信号光波长与相应的最佳准相位匹配温度一一对应, 最佳 QPM 温度随信号光波长增大而单调升高, 例如, 对于给定的 1060 nm 抽运光, 波长为 1560 和 1580 nm 信号光的最佳 QPM 温度分别为 70.8 和 117.3 $^{\circ}\text{C}$ (如图中 A, B 点所示). 这时, 若将

晶体温度分别置于 70.8 和 117.3 $^{\circ}\text{C}$, 当信号光波长分别在 1560 和 1580 nm 附近变化时, 由(2)式, 对 1060 nm 的抽运光, 将仍然满足 QPM 条件. 图 1(b) 给出了相应的模拟结果, 可见, 在 70.8 和 117.3 $^{\circ}\text{C}$ 的温度下, 当信号光波长在 1559.2 至 1560.9 nm 和 1579 至 1580.9 nm 之内变化时, 失谐量处于虚线 a, b 之间, 满足 QPM 条件, 但 QPM 允许的信号光波长变化范围仅在 2 nm 之内. 采用其它抽运光波长和相应最佳 QPM 温度进行类似的模拟, 结果也表明, 在给定抽运光波长及其相应最佳 QPM 温度时, 允许的信号光波长变化范围均较小.

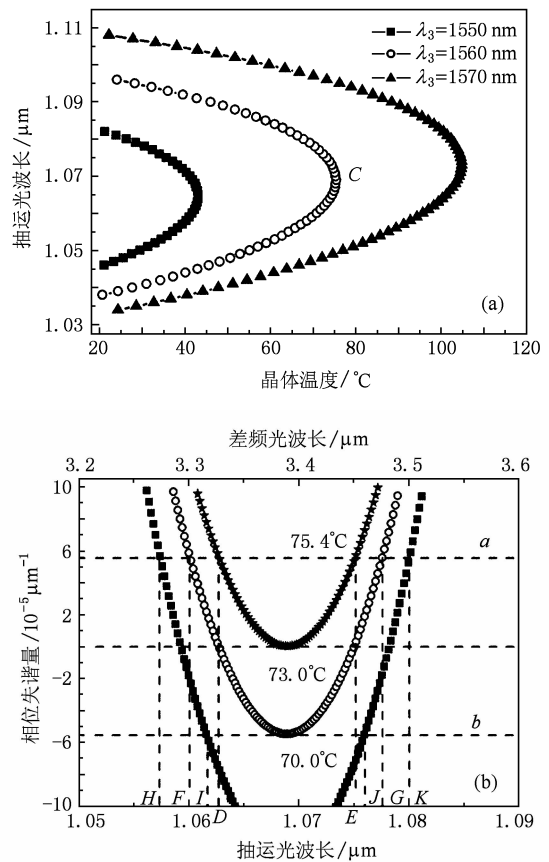


图2 数值模拟结果 (a) 给定信号光波长下抽运光波长与最佳准相位匹配温度间关系;(b) 当信号光波长为 1560 nm 时, 给定晶体温度下抽运光波长变化时的相位失谐特性

另一方面, 若将信号光波长固定, 则抽运光波长与对应最佳 QPM 温度之间的关系如图 2(a) 所示. 这时, 对于给定的不同波长的信号光, 随着抽运光波长逐渐增大, 最佳 QPM 温度在开始阶段均单调增加, 但当抽运波长超过一定值时, 最佳 QPM 温度随抽运波长的增大反而降低, 即存在一个最大的最佳 QPM 温度. 对于 1560 nm 的信号光, 最大的最佳

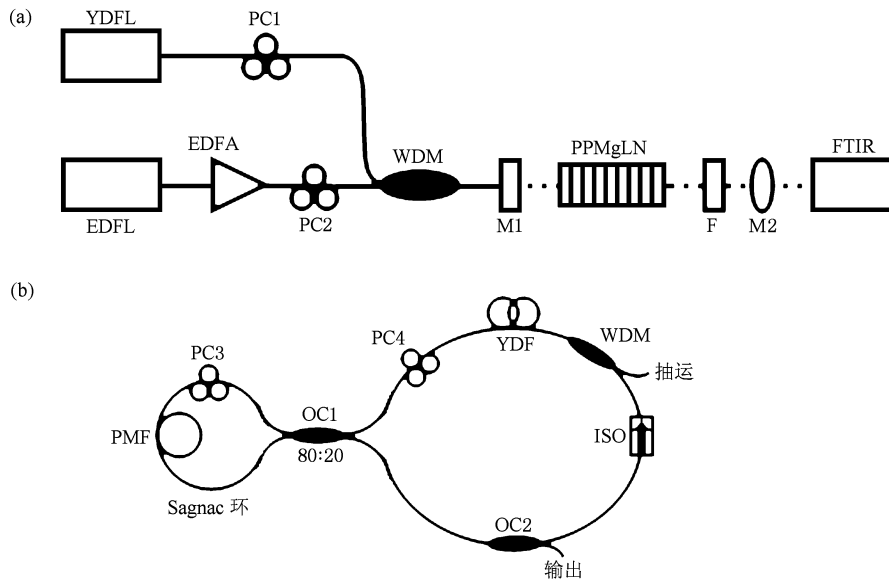


图3 结构示意图 (a)多波长中红外 DFG 激光源;(b)多波长 YDFL

QPM 温度为 $75.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 此时抽运光波长为 1069 nm (图中 C 点); 而当设置晶体温度低于 $75.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在同一晶体温度下, 同时存在两个抽运光波长处于最佳 QPM 状态, 随着晶体设置温度增大, 这两个抽运光间的波长间隔逐渐减小, 当晶体温度至 $75.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时退化为同一抽运波长.

为进一步研究给定信号光波长下, 不同晶体温度设定时 QPM 条件所允许的抽运光波长变化范围, 我们对 1560 nm 的信号光、并将晶体温度设置在 $75.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近进行了模拟, 结果如图 2(b) 所示. 由该图可见, 当晶体温度设为 $75.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 1069 nm 的抽运光相位失谐量为零, 同时, 满足 QPM 条件 (虚线 a, b 之间) 的抽运光波长变化范围为 $1063\text{--}1075\text{ nm}$ (图中 D 和 E 点之间). 当将晶体温度设置在较低温度, 如 $73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 图中 F 和 G 两点间的所有波长的抽运光均满足 QPM 条件, 这时, 满足 QPM 条件的抽运光波长变化范围为 $1061\text{--}1078\text{ nm}$, 达 17 nm , 由于该温度下的相位失谐与抽运光波长间的关系曲线恰好与直线 b 相切, 使得 QPM 条件所允许的抽运光波长变化范围最大. 当晶体温度继续下降, 如 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 由虚线 a 和 b 决定的满足 QPM 条件所允许的抽运光波长变化范围将分裂成 H 和 I, J 和 K 两个区域, 此时每个准相位匹配峰中的抽运光波长范围均较小, 仅约 4 nm . 对于处于掺铒光纤 (EDF) 增益带宽内的其它给定的信号光波长, 也进行了类似的模拟, 结果均表明, 处于掺铒光纤 (YDF) 增益带宽内的抽运光波长具有类似的准相位匹配特性, 即通过

优化设置晶体温度, 利用晶体自身的色散关系及其温度特性, 可使一定温度下, 抽运光在较宽的波长范围内均能满足 QPM 条件.

根据以上模拟结果, 当采用 1550 nm 波段的 EDFL 和 1060 nm 波段的 YDFL 分别作为 DFG 的信号和抽运光源时, 由于 1060 nm 波段抽运光的满足 QPM 条件的波长变化范围远大于 1550 nm 波段信号光的波长变化范围, 因此, 选取 YDFL 作为调谐或多波长基频光源, 将比 EDFL 作为调谐或多波长基频光源更有利于获得宽带调谐或多波长输出的中红外 DFG 激光系统.

3. 实验装置

图 3(a) 为多波长 DFG-QPM 中红外激光系统结构示意图, 由抽运源、信号源、差频产生三部分组成. 抽运源采用 1060 nm 波段多波长 YDFL, 其结构如图 3(b) 所示, YDFL 采用环形腔结构^[16], 为保证单向运转, 腔内插入光隔离器 (ISO). 975 nmLD 用作抽运源, 最大输出功率 200 mW , 抽运光经波分复用耦合器 (WDM) 耦合进掺铒光纤, 掺铒光纤长 5 m , 在 976 nm 处的吸收系数为 199 dB/m . 基于光纤耦合器 (OC1) 的 Sagnac 环用作梳状波滤波器, 用于产生多波长振荡, 该梳状波滤波器由基于 OC1 的光纤环中熔接一段保偏光纤 (PMF) 构成, 环内还接入光纤型偏振控制器 (PC4), 而 PC3 用于控制梳状波滤波器输入光的偏振态, 提高激光振荡的稳定性,

OC2 则用于激光输出. 图 4 给出了多波长 YDFL 的输出光谱, 由图中可见, YDFL 共有 15 个激光波长, 波长范围为 1056—1074 nm, 间隔约为 1.4 nm, 除最左边谱线外, 各波长的功率起伏均小于 5 dB, 总输出功率约为 15 mW. 信号源由 1550 nm 单波长 EDFL 及掺铒光纤放大器 (EDFA) 组成, EDFL 和 EDFA 均为自制^[17-19]. EDFL 为线形腔结构, 输出激光中心波长和输出功率分别为 1560 nm 和 12 mW. EDFA 采用 980 nm LD 正向和 1480 nm 反向抽运, 以同时获得低噪声和高输出功率^[20], EDFL 输出激光经 EDFA 功率提升后的功率达 150 mW. 抽运源和信号源的输出分别经光纤型偏振控制器 (PC1, 2) 控制其偏振态, 并由 1060/1550 宽带波分复用器 (WDM) 合波, 再经聚焦耦合系统 (Lens) 输入至非线性晶体. 聚焦耦合系统由带尾纤的自聚焦透镜和聚焦 100 mm 的透镜构成. 非线性晶体选用掺 MgO 的周期极化铌酸锂 (PPMgLN) 晶体, 其几何尺寸和周期分别为 50 mm × 1 mm × 1 mm 和 30 μm. PPMgLN 被放置在温控炉内, 温控炉温度调节范围为 0—200 °C、控制精度 ±0.1 °C. 温控炉置于多维精密调整平台上, 以便于晶体位置调节. 产生的差频光经截至波长为 2500 nm 的长通滤波器 (F) 滤除剩余抽运光和信号光, 再由焦距 100 mm 的 CaF₂ 透镜准直输出至傅里叶光谱仪 (FTIR) 测量.

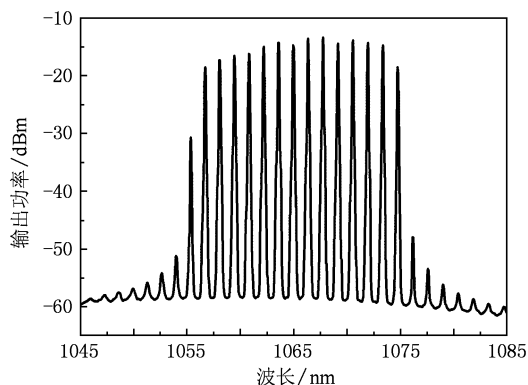


图 4 多波长 YDFL 的输出谱

4. 实验结果与讨论

首先将晶体温度设定为 73.5 °C, 同时调节 PC 优化抽运光和信号光的偏振态方向, 利用图 1 所示的 DFG 中红外光源系统获得了多波长激光同时输出. 图 5(a) 为实验测得的中红外输出光谱. 由图可见, 共有 14 个中红外激光波长, 波数范围为 2890—

3055 cm⁻¹, 相应波长范围为 3460—3273 nm, 中红外激光总带宽和波长间隔分别约为 180 和 14 nm, 各中红外谱线均与图 4 中多波长抽运光波长相对应. 由此可见, 在固定的晶体温度下, 抽运光在 1060 nm 波段确实存在一个宽的抽运光波长范围满足 QPM 条件, 与图 2(a) 模拟结果基本符合.

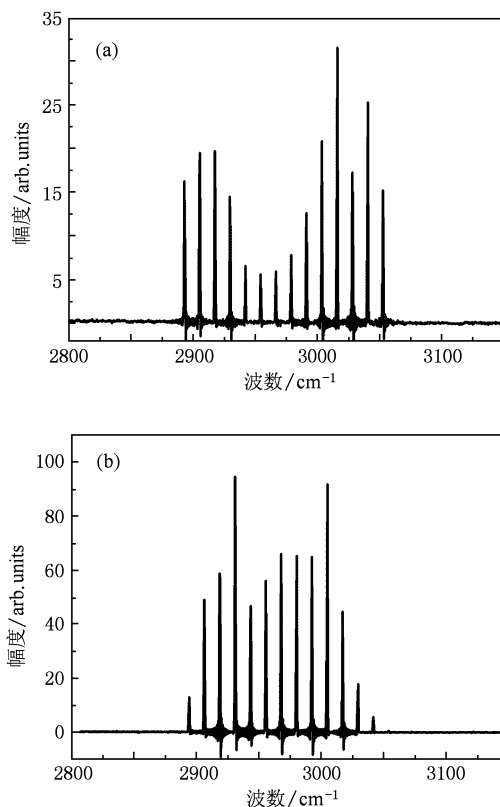


图 5 多波长中红外 DFG 激光源输出谱 (a) $T = 73.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$

另一方面, 图 5(a) 所示的中红外多波长激光输出的幅度并不平坦, 且在中央谱线附近存在明显凹陷, 这与抽运光各波长的功率不完全一致有关, 但主要是因各抽运波长处相位失配量不同而引起转换效率的起伏. 事实上, 根据模拟结果, 晶体工作温度影响 QPM 条件所允许的抽运光波长变化范围及各波长处相位失谐量大小. 为此, 实验研究了不同晶体温度下的中红外多波长输出特性, 图 5(b) 给出了晶体温度为 75 °C 时的实验测出的中红外输出谱, 由图可见, 中红外激光的波长数为 13 个, 与图 5(a) 相比, 此时中红外谱线的平坦度有显著改善, 但波长数略有下降, 表明此时满足 QPM 条件的波长范围略有减小.

此外, 由模拟结果, 对于 1550 波段的不同波长信号光, 抽运光均存在较宽的 QPM 接受带宽. 为此,

实验研究了信号光波长的改变对中红外多波长输出特性的影响. 图 6 为信号光波长调节至 1555 nm 时中红外多波长激光的输出谱, 可见, 此时的中红外激光输出的波长数仍为 14 束, 但波数范围移至 2875—3030 cm^{-1} , 即 3478—3300 nm, 各中红外波长均朝长波长方向相应移动. 这表明, 信号光波长变化时, 仍能保持宽带 QPM 波长接受带宽. 基于此, 通过改变信号光的波长, 即可实现中红外多波长激光的同步波长调谐.

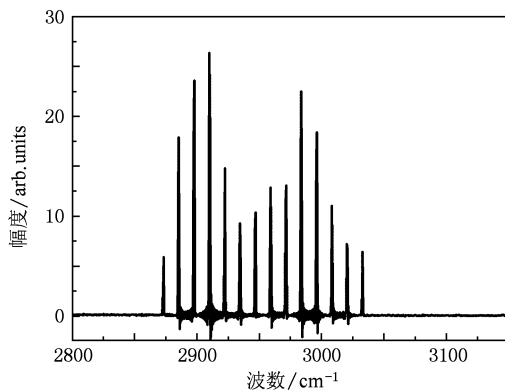


图 6 多波长中红外 DFG 激光源输出谱 ($\lambda_s = 1555 \text{ nm}$, $T = 59 \text{ }^\circ\text{C}$)

在实验中, 我们还将基频光源替换为多波长 EDFL 和单波长 YDFL, 其中单波长 YDFL 中心波长为 1064.9 nm, 多波长 EDFL 结构与多波长 YDFL 相同 (见图 3(b)), 其经 EDFA 放大后的多波长输出谱如图 7(a) 所示, 共有 15 个波长, 波长范围为 1558—1574 nm, 波长间隔 1.2 nm. 这时, DFG-QPM 系统的典型输出谱如图 7(b) 所示, 仅有两个差频波长输出, 波数分别为 2971.7 和 2975 cm^{-1} . 并且, 实验发现, 改变晶体温度虽可使该两个中红外激光波长发生移动, 但波长数目始终保持不变, 从而表明, 尽管基频光源处于相同波段, 因所选多波长基频光源不同, 导致了中红外激光输出的迥异, 这也从另一个侧面验证了模拟结果.

顺便指出, 尽管上述 DFG-QPM 系统基频光源均采用了稀土掺杂光纤激光器, 事实上若将基频信号光源用 DFB 半导体激光器来代替, 采用电流调制技术, 完全可实现中红外多波长激光调制, 进而应用于实际检测.

5. 结 论

针对由 YDFL 和 EDFL 作为基频光源的 QPM-

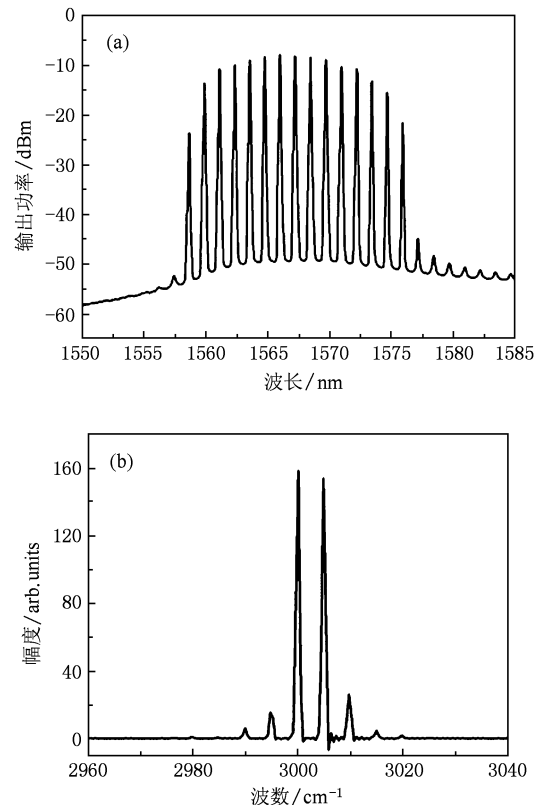


图 7 输出谱线 (a) 多波长 EDFL; (b) 多波长中红外 DFG 激光源

DFG 激光系统, 利用 PPMgLN 晶体自身的色散关系及其温度特性, 有效拓宽了 QPM 波长接受带宽. 模拟结果表明, 在相同的中红外波段, 抽运光和信号光的相位匹配特性存在明显差异; 当采用 1550 nm 波段的 EDFL 和 1060 nm 波段的 YDFL 分别作为 DFG 的信号和抽运光源时, 1060 nm 波段抽运光的满足 QPM 条件的波长变化范围远大于 1550 nm 波段信号光的波长变化范围. 当信号光波长固定为 1560 nm 时, 对于给定的晶体温度, 1060 nm 波段的抽运光的 QPM 接受带宽超过 17 nm, 对应于中红外差频光带宽可约 180 nm. 在此基础上, 采用多波长 YDFL 作为抽运源, 单波长 EDFL 后接 EDFA 作为信号源, 在保持 PPMgLN 晶体温度和极化周期 73.5 $^\circ\text{C}$ 和 30 μm 不变的前提下, 实验获得了波长间隔为 14 nm 的 14 个中红外激光波长的同时输出, 实验结果与模拟结果基本符合, 并且, 改变信号光波长, 可实现对这种中红外多波长激光的同步调谐. 这种多波长 DFG/QPM 中红外激光光源可望应用于多组分痕量检测.

- [1] Richter D, Fried A, Wert B P, Waldga J G, Tittel F K 2001 *Appl. Phys. B* **75** 281
- [2] Takahashi M, Ohara S, Tezuka T, Ashizawa H, Endo M, Yamaguchi S, Nanri K, Fujioka T 2004 *Appl. Phys. B* **78** 229
- [3] Ding X, Zhang S M, Ma H M, Pang M, Yao J Q, Li Z 2008 *Chin. Phys. B* **17** 0211
- [4] Wu B, Cai S S, Shen J W, Shen Y X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2684 (in Chinese) [吴波、蔡双双、沈剑威、沈永行 2007 物理学报 **56** 2684]
- [5] Zhang T L, Zhang B G, Xu D G, Wang P, Ji F, Yao J Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 633
- [6] Straub A, Gmachl C, Sivco D L, Sergent A M, Capasso F, Cho A Y 2002 *Electron. Lett.* **38** 565
- [7] Asobe M, Tadanaga O, Umeki T, Yanagawa T, Nishida Y, Magari K, Suzuki H 2007 *Opt. Lett.* **32** 3388
- [8] Umeki T, Asobe M, Nishida Y, Tadanaga O, Magari K, Yanagawa T, Suzuki H 2007 *Opt. Lett.* **32** 1129
- [9] Chou M H, Parameswaran K R, Fejer M M, Brener I 1999 *Opt. Lett.* **24** 1157
- [10] Lee Y L, Noh Y C, Jung C, Yu T J, Yu B A, Lee J, Ko D K, Oh K 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 011104
- [11] Yanagawa T, Kanbara H, Tadanaga O, Asobe M, Suzuki H, Yumoto J 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161106
- [12] Gao Z S, Han L, Liang W G, Deng L H, Wang H, Xu C Q, Chen W D, Zhang W J, Gong Z B, Gao X M 2008 *Opt. Commun.* **281** 3878
- [13] Ashizawa H, Ohara S, Yamaguchi S, Takahashi M, Endo M, Nanri K, Fujioka T, Tittel F K 2003 *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** 1263
- [14] Yanagawa T, Tadanaga O, Nishida Y, Miyazawa H, Magari K, Asobe M, Suzuki H 2006 *Opt. Lett.* **31** 960
- [15] Zelmon D E, Small D L, Jundt D 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 3319
- [16] Mao Q H, Zhu Z J, Sun Q, Liu W Q, Lit J W Y 2008 *Opt. Commun.* **281** 3153
- [17] Feng S J, Shang L, Mao Q H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4677 (in Chinese) [冯素娟、尚亮、毛庆和 2007 物理学报 **56** 4677]
- [18] Mao Q H, Feng S J, Jiang J, Zhu Z J, Liu W Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 296 (in Chinese) [毛庆和、冯素娟、蒋建、朱宗玖、刘文清 2007 物理学报 **56** 296]
- [19] Jiang J, Li X Q, Feng S J, Wang Z S, Mao Q H, Liu W Q 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 295 (in Chinese) [蒋建、李晓芹、冯素娟、王执山、毛庆和、刘文清 2008 光学学报 **28** 295]
- [20] Mao Q H, Sun X H, Zhang M D, Wang J S 1999 *Opt. Commun.* **159** 149

Mid-IR multiwavelength difference frequency generation laser source based on fiber lasers *

Jiang Jian Chang Jian-Hua Feng Su-Juan Mao Qing-He[†]

(Anhui provincial Key Lab of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 9 November 2009; revised manuscript received 30 January 2010)

Abstract

The quasi-phase-matched (QPM) wavelength acceptance bandwidth for a difference frequency generation (DFG) mid-IR laser source with fiber lasers as the fundamental sources is effectively broadened by using the dispersion relations and its temperature characteristic of periodically poled MgO-doped LiNbO₃ (PPMgLN). Our simulation results show that, with an erbium-doped fiber laser (EDFL) and a ytterbium-doped fiber laser (YDFL) respectively operating near 1550 and 1060 nm wave-bands as the signal source and pump source, for the same mid-IR wavelength regions, the allowable wavelength range given by the QPM condition for the pump wave is much larger than that for the signal wave. When the wavelength of the signal wave is fixed at 1560 nm, for a given optimized crystal temperature, the acceptance bandwidth for the pump wave is over 17 nm, corresponding to the acceptance bandwidth for the idler wave of about 180 nm. Based on it, by using a multiwavelength YDFL and a single wavelength EDFL cascaded by an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) respectively as the pump source and the signal source, 14-wavelength mid-IR laser lines, with a spacing of about 14 nm in between, are obtained simultaneously with our QPM-DFG laser system when both the temperature and the grating period of the PPMgLN used being kept unchanged at 73.5 °C and 30 μm respectively. Moreover, the mid-IR multiwavelength laser lines may be tuned synchronously by varying the signal wavelength.

Keywords: difference frequency generation (DFG), quasi-phase-matching (QPM), multiwavelength mid-IR, fiber laser
PACC: 4265K, 4255N, 7830G

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60677050), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB936603).

[†] Corresponding author. E-mail: mqinghe@aiofm.ac.cn