

文章编号: 1001-3806(2011)03-0338-05

固体 Raman 激光器与 OPO 激光器比较

孙国正

(中国兵器科学研究院 信息技术部, 北京 100089)

摘要: 综述了近5年来固体 Raman 激光器和光参量振荡(OPO)激光器的发展情况,并对 Raman 激光器和 OPO 激光器在工作原理、晶体材料方面进行了比较。Raman 激光器在光束质量、光路稳定方面存在优势,而 OPO 激光器调谐范围大,输出功率高。最后对固体 Raman 激光器和 OPO 激光器发展前景进行了简要介绍。

关键词: 激光技术; Raman 激光器; 光参量振荡激光器; 晶体材料

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.014

Comparison between all-solid-state Raman lasers and OPO lasers

SUN Guo-zheng

(Department of Information Technology, Ordnance Science Institute of China, Beijing 100089, China)

Abstract: The development of all-solid-state Raman laser and optical parametric oscillation(OPO) laser were summarized during the past five years. The principle and crystal of Raman laser and OPO laser were compared. An all-solid-state Raman lasers has advantages in beam quality and optical stability. While, an OPO laser has a larger tuning range and higher output power. Finally, the future development of all-solid-state Raman and OPO lasers was put forward.

Key words: laser technique; Raman laser; optical parametric oscillation laser; crystal material

引言

1928年,印度物理学家 RAMAN 首次发现喇曼散射现象^[1],1962年,WOODBURY 和 NG 用硝基苯克尔盒对红宝石激光器进行调 Q 研究时,首次发现了受激喇曼散射现象:除了产生的波长为 694.3nm 的激光外,还存在 765.8nm 的激光谱线,相对激光频移为 1345cm^{-1} 。

早期的喇曼激光器通常采用甲烷等气体作为喇曼介质,但由于易泄漏、易受污染、浓度低和输出能量低等缺点影响了应用。固体喇曼激光器具有高增益、结构紧凑、效率高、稳定性好等优点^[2],同时,具有良好的热传导性能和机械性能,可以运行于高的重复频率。基于固体喇曼激光器的以上优点,在信息、交通、测量、医疗、国防和工农业等领域都有广泛的应用。如通过 532nm 光的抽运产生 578nm 的喇曼输出,578nm 波长的光正好是血红蛋白的吸收带^[2],在医学测量上非常有用。同时黄光波段的激光接近人眼最敏感的波长 555nm,适合于激光显示和照明^[3]。

光学参量振荡器(optical parametric oscillation, OPO)是利用参量转换过程实现非线性频率变换的一种方法,1962年,ARMSTRONG 等人分别提出了光参量放大和产生可调谐光的建议^[4];1965年 WANG 和 RACETTE 首次在试验中观察到了 3 波非线性过程中的参量增益^[5],同年,美国贝尔实验室的 GIORDMAINE 和 MILLER 用 Q 开关多模 Nd:GaWO₃ 激光通过 LiNbO₃ 晶体,获得了 0.97 μm ~ 1.15 μm 的参量信号输出^[6]。之后,世界各国都展开了对参量振荡器的研究。

OPO 激光器具有调谐范围宽、效率高、结构简单及工作可靠等特点,可获得宽带可调谐、高相干的辐射光源。近年来,随着一批新型优质非线性光学晶体的发明、成熟和大量应用,以及非线性光学频率变换和可调谐激光技术的飞速发展,光参量振荡器展现出越来越重要和广泛的应用前景。其主要应用领域包括:环境监测、遥感、医疗诊断和治疗、激光光谱学研究、材料处理、数据通信、光电测量、激光测距、激光雷达、红外对抗等^[7]。

1 工作原理及晶体材料比较

固体喇曼激光器是利用喇曼晶体的受激喇曼散射(stimulated Raman scattering, SRS)效应 3 阶非线性效应来实现光波的频率变换,通过与分子(或原子)的非

作者简介:孙国政(1968-),男,副研究员,现主要从事激光技术与光电探测方面的研究。

E-mail:raman@sohu.com

收稿日期:2010-07-23;收到修改稿日期:2010-08-24

弹性相互作用,入射光子的能量发生改变,分子的能级发生变化^[8]。SRS 效应分为两种:一种是斯托克斯(Stokes)散射 $\omega_p = \omega_i + \omega_R$ (ω_p 为入射抽运光, ω_R 为 Raman 输出光, ω_i 为频差),一种是反斯托克斯(anti-Stokes)散射 $\omega_p = \omega_R - \omega_i$ (通常反斯托克斯谱线一般要比斯托克斯谱线弱很多。)

OPO 激光器是利用 OPO 晶体的 2 阶非线性效应,将符合匹配条件的线偏振抽运光转换为参量振荡信号光和闲频光,只能进行频率下转换,即 $\omega_p = \omega_i + \omega_s$ (ω_p 为入射抽运光, ω_s 为信号光, ω_i 为闲频光),光参量谐振腔使光往返振荡得到增益,并形成特定波长的激光输出。

SRS 可以描述成 3 阶非线性磁化率 χ^3 有关的非线性相互作用^[9],在介质中出现喇曼谐振时,3 阶磁化率降低为峰值喇曼磁化率 χ_R'' (总磁化率的虚数部分)。

恒定的抽运场,斯托克斯场增益系数可以表示为:

$$g_s = \frac{\omega_s \chi'' |E_p|^2}{n_s c} = \frac{4\pi \chi'' I_p}{\lambda_s n_s n_p \epsilon_0 c} = \frac{\lambda_p \lambda_s^2 N (d\sigma/d\Omega) I_p}{n_s^2 hc \pi \Delta\nu_R} \quad (1)$$

式中, λ_p 为抽运光波长, λ_s 为斯托克斯波长, N 为分子数密度, $d\sigma/d\Omega$ 为自发喇曼散射截面, I_p 为抽运强度, n_s 为斯托克斯光折射率, n_p 为抽运光折射率, ϵ_0 为真空介电常数, h 为普朗克常量, c 为光速, $\Delta\nu_R$ 为喇曼线宽的半峰全宽。从中可以看出,喇曼介质的增益与入射光束的强度、激活介质的截面和喇曼盒的长度成正比。

理想情况下喇曼激光器最大理论转换效率为:

$$\eta = \frac{\nu_p - \nu_R}{\nu_p} \quad (2)$$

式中, ν_p 为抽运光频率, ν_R 为喇曼光频率。

OPO 是一个 3 波混频的过程,其有效增益系数定义为:

$$g_{\text{eff}} = \left[\frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 I_p}{\lambda_s \lambda_i n_s n_i n_p \epsilon_0 c} - \left(\frac{1}{2} \Delta k \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, d_{eff} 为有效非线性系数, λ_s 为信号光波长, λ_i 为闲频光波长, n_s 为信号光折射率, n_i 为闲频光折射率, n_p 为抽运光折射率。 $\Delta k = |k_p - (k_i + k_s)|$, 其中 $k_j = 2\pi n_j / \lambda_j, j = p, s, i, k_j$ 为 3 个波长的传播常量。

为了得到最大的增益必须使光波相位匹配,即 $\Delta k = 0$:

$$k_p = k_i + k_s \Rightarrow n_p \omega_p = n_s \omega_s + n_i \omega_i \quad (4)$$

按照入射抽运光的偏振态,可将相位匹配方式分为两类^[10]。在第 I 类中,信号光和闲频光的偏振方向相

同,而抽运光的偏振态与它们垂直。另一类相位匹配方式通常称作非线性晶体的 II 类匹配,具体实现是使抽运光和信号光(闲频光)的偏振方向相同,而与闲频光(信号光)的偏振方向相反。

在小信号近似条件下,3 波相互作用效率可以表示为:

$$\eta = \eta_0 \left[\frac{\sin\left(\frac{\Delta k z}{2}\right)}{\frac{\Delta k z}{2}} \right]^2 \quad (5)$$

式中, $\eta_0 = \sin^2 \left[\left(\frac{8\pi^2 d_0^2 I_p}{\lambda_s \lambda_i n_s n_i n_p \epsilon_0 c} \right)^{\frac{1}{2}} z \right]$ 是理想匹配的转换效率, z 为晶体长度。

SRS 与 OPO 的比较见表 1。

表 1 受激喇曼散射与光学参量振荡比较

	光束质量	脉冲压缩	相位匹配	效率	量子缺陷
1 级受激喇曼散射	很好 cleanup 现象	窄脉冲 压缩比 2~7	无需	接近 量子效率	存在 热效应
光学参量振荡	差	变窄	需要	取决于 相位匹配	不存在 热效应

固体喇曼激光器与 OPO 参量振荡变换相比,在光束质量方面,因其具有独有的 cleanup 现象^[11],光束质量要优于基频光,而 OPO 参量振荡与基频光相较要变差;在脉冲宽度压缩方面,固体喇曼激光器的脉宽压缩比可达到 2 倍~7 倍,要好于其它非线性频率变换方法,能够实现激光在时间的压缩,是脉宽压缩^[12]的实用方法之一;此外,固体喇曼激光器无需相位匹配,转换效率接近量子效率;固体喇曼激光器的缺点是存在着量子缺陷,易在激光晶体中储能产生热效应。

喇曼晶体是喇曼激光器的核心部分,现今经常使用的喇曼晶体及性能如表 2^[13-14] 所示。

表 2 喇曼晶体性能参量

喇曼晶体	喇曼频移 /cm ⁻¹	喇曼线宽 /cm ⁻¹	喇曼吸收@1064nm /(cm·GW ⁻¹)	损伤阈值 /(GW·cm ⁻²)
LiIO ₃	822	5.0	4.8	0.1
PbMO ₄	870	8	8	0.4
SrMO ₄	888	2.8	6	
Ba(NO ₃) ₂	1047	0.4	11	0.4
BaWO ₃	926	1.6	8.5	
CaWO ₃	908	4.8	3.0	0.5
KGd(WO ₄) ₂	768	6.4	4.4	10
	901	5.4	3.5	
KY(WO ₄) ₂	767	8.4	3.6	
	905	7	5.1	
PbWO ₃	904	4.7	3.1	1
SrWO ₃	922	2.7	5.0	5
GdVO ₄	885	3.0	>4.5	1
YVO ₄	892	2.6	>4.5	1

从表 2 中可以看出, Ba(NO₃)₂ 晶体具有最高的增益系数、最窄的喇曼线宽和最大喇曼增益系数,被认

为是纳秒脉冲首选的喇曼晶体,然而 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 的瞬态喇曼增益系数只有稳态时的几分之一,因而不适合于皮秒脉冲的频移。 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 的透光范围较广,可以覆盖 $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 中红外波段,且该晶体的抗光伤阈值较高,不潮解,导热系数高,因而,以后可能在中红外波段喇曼激光器方面发挥重要作用。钽离子掺杂的 YVO_4 和 GdVO_4 ,由于同时具有优异的激光性能和喇曼性能,是稳定自喇曼激光器最具潜力的介质之一。

OPO 的研究和实现过程中有两类非线性晶体可以获得应用^[15]。一类是准相位匹配材料,其优点是

效非线性系数增大,如周期性极化铌酸锂(periodically poled lithium niobate, PPLN),周期极化的准位相匹 KTP 倍频器(periodically poled potassium titanyl phosphate, PPKTP),周期性极化磷酸钛氧铷(pikes peak rural transportation authority, PPRTA)和周期性极化化学计量比钽酸锂(periodically poled stoichiometric lithium tantalate, PPSLT)等。周期性极化材料最大的问题是极化深度有限,限制了晶体尺寸。另一类是传统意义上的双折射相位匹配材料,如 KTP 系列等,非线性系数较小,但尺寸大,成本低。

从表 3 中可以看出,ZGP 是非线性系数最大的晶

表 3 光参量振荡晶体性能参量

OPO 晶体	非线性系数 $/(\mu\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	透光范围 $/\mu\text{m}$	吸收系数@ $1\mu\text{m} \sim 4\mu\text{m}$ $/\text{cm}^{-1}$	损伤阈值@ 1064nm $/(\text{MW} \cdot \text{cm}^{-2})$	匹配方式	晶体尺寸 $/\text{mm}^3$
PPLN	15	0.4 ~ 4		> 100		$(3 \times 3) \times 30$
PPKTP	8.7	0.4 ~ 4		> 900		$(1 \times 2) \times 30$
PPSLT	10	0.4 ~ 4		> 570		$(1 \times 2) \times 30$
LiIO_3	$d_{31} = 5.4$	0.33 ~ 5.5	< 0.06	> 60	Type I	$(10 \times 10) \times 15$
KTA	$d_{24} = 3.2$	0.35 ~ 5.3	< 0.01	> 600	Type II	$(10 \times 10) \times 20$
KTP	$d_{33} = 3.75$	0.35 ~ 4.5	< 0.01	> 900	Type II	$(15 \times 15) \times 25$
ZnGeP_2	$d_{36} = 75$	0.7 ~ 12	< 0.01	> 30000	Type I	$(8 \times 12) \times 25$
AgGaS_2	$d_{36} = 13$	0.5 ~ 13	< 0.09	> 25	Type I	$(10 \times 7) \times 20$
AgGaSe_2	$d_{36} = 33$	0.7 ~ 18	< 0.09	> 25	Type I	$(10 \times 7) \times 20$

体,而且其热导率较高,尺寸也能做到较大,是较理想的非线性晶体。

2 发展现状

现在固体喇曼激光器谐振腔的配置主要有两种——外腔式和内腔式配置。其中,内腔式配置包括自喇曼激光器。

OPO 技术按相位匹配方式有 I 类、II 类之别;腔型从直腔发展为 3 镜、4 镜、多镜折叠环形腔结构;与 Raman 激光器类似,根据 OPO 是否置入激光腔内,还可以分为内腔式 OPO 和外腔式 OPO。

迄今为止,固体 Raman 激光器的发展主要围绕如何提高所需波长的输出功率、转换效率进行,同时由于 Raman 激光器固有的热效应问题,冷却方法的优化也是近年来研究的重点方向。2006 年澳大利亚 Macquarie 大学的 MILDREN 和 PASK 等人采用外腔式配置^[16](见图 1),利用 532nm 的基频光与钨酸钪钾($\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, KGW)喇曼晶体相互作用,同时利用 KGW 的偏振依靠属性分别产生 588nm 和 579nm 的 1 级喇曼红橙光输出。在工作频率为 5kHz、脉宽 10ns 的情况下,输出功率分别为 1.5W 和 1.22W,转换效率为 64% 和 58%,是迄今为止此类激光器得到的最好结果。

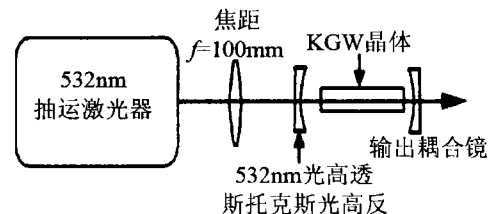


图 1 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 外腔式喇曼激光器

2007 年 MILDREN 等人又报道了一个离散可调谐外腔式紫外波段喇曼激光器^[17](见图 2),采用 BBO

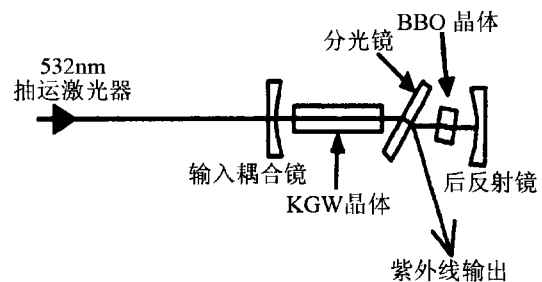


图 2 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 外腔式紫外波段离散可调谐喇曼激光器

(偏硼酸钡)非线性晶体对 532nm 基波以及 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ 喇曼晶体产生的瀑布式 Stokes 波进行倍频/和频,可输出覆盖 266nm ~ 320nm 范围的 8 个离散可调谐波长。在 10Hz 重频下,单脉冲能量可达 0.22mJ,5kHz 重频下的平均功率为 48mW。

2008 年山东大学和中国科学院福建物质结构研究所的 CHEN 等人报道了一个 Nd:YAG-SrWO₄(掺钕

钕铝石榴石-钨酸锶)内腔喇曼激光器^[18](见图3),采

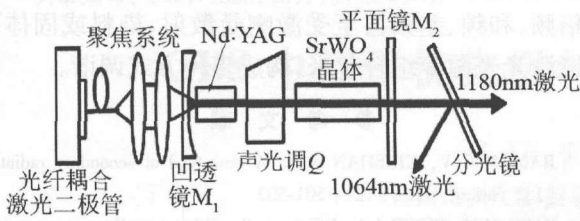


图3 Nd:YAG-SrWO₄ 内腔式喇曼激光器

用光纤耦合抽运的方式,在15kHz重频条件下,获得了1180nm输出光最大平均功率1.71W,相应光光的转换效率高达23.8%。同年台湾CHANG等人报道了一个Nd:Y_{0.3}Gd_{0.7}VO₄内腔式瀑布喇曼激光器^[19](见图4),在重频50kHz条件下,实现了4阶喇曼波长的

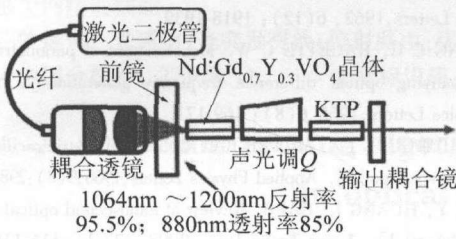


图4 Nd:Y_{0.3}Gd_{0.7}VO₄ 内腔式瀑布喇曼激光器

输出:1096nm,1129nm,1166nm和1204nm,平均输出功率分别为0.05W,0.61W,0.25W和0.11W,同时在腔内放置KTP晶体,激发产生的4阶Raman光最大峰值功率超过2kW。

2010年YANG等人报道了端面抽运连续可调谐黄光喇曼激光器,采用Nd:YVO₄+SrWO₄+LBO(掺钕钒酸钇+钨酸锶+三硼酸锂)晶体腔内配置^[20](见图5),得到590nm黄光最大输出功率为230mW,同时

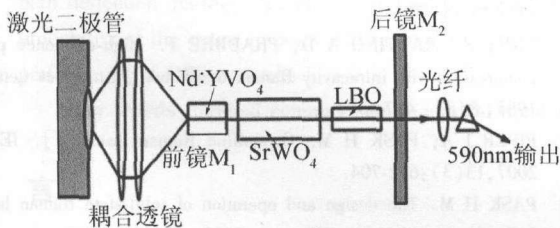


图5 端面抽运连续可调谐黄光喇曼激光器

实验表明SrWO₄晶体的偏振方向对输出功率有这很大的影响,对该领域的研究有着较大的指导意义。同年,清华大学WANG等人利用分布式侧面抽运波长捷变固体喇曼激光器^[21-22](见图6)实验输出1177nm

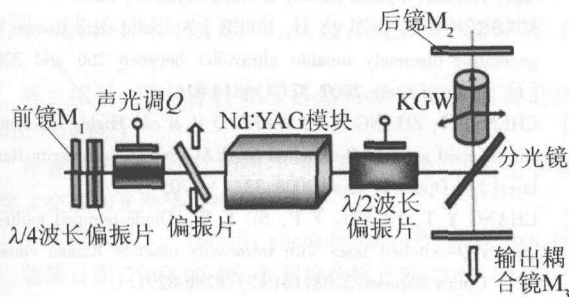


图6 环形分段间隔侧抽运双波长捷变固体喇曼激光器

(1159nm)波长时,脉冲能量达114mJ(98mJ),峰值功率为19MW(15MW),光光效率为15.3%(13.2%),对于采用传导致冷方式的Nd:YAG-KGW喇曼激光器,是迄今为止最好的指标。

与Raman激光器相比,OPO激光器的发展除了要提高所需波长的输出功率、转换效率之外,如何高效获得连续波长的输出及准相位匹配晶体在实验中的应用也是其研究重点。

2006年,ZENG采用被动调Q的Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG(掺钕钒铝石榴石/掺铬钒铝石榴石)激光抽运的KTP-OPO(磷酸钛氧钾晶体光参量振荡器)获得了平均功率大于3.8W、重复频率约80kHz的1.57μm波长的信号光输出,脉宽为30ns,脉冲峰值功率达到1.58kW^[23-24](见图7)。

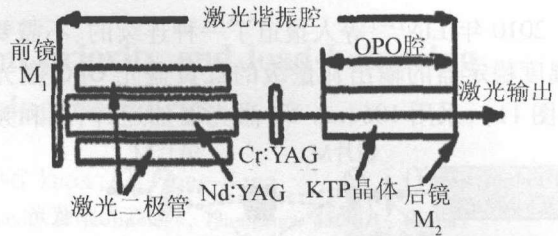


图7 被动调Q的Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG抽运KTP-OPO

2008年,LIU等人利用磷酸钛氧钾光参量振荡器^[25](见图8),在Nd:YAG抽运功率为96.3W、

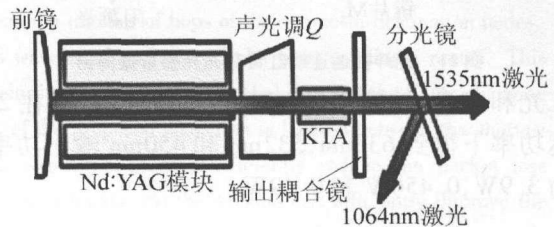


图8 侧面抽运声光调Q磷酸钛氧钾光参量振荡器

重复频率为10kHz时,获得了2.54W的1.53μm激光输出,脉宽为5.01ns,峰值功率为50.7kW,光光转换效率2.6%。

2009年,DONG等人采用非严格相位匹配的KTA晶体^[26](见图9),以声光调QNd:YAG激光器侧面抽

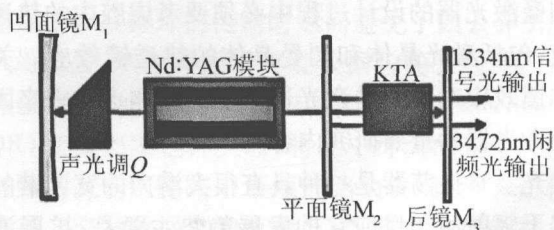


图9 内腔式声光调Q磷酸钛氧钾光参量振荡器

运,镜片M₂对信号光及闲频光高反,获得1534nm信号光和3472.7nm闲频光功率分别为13.6W和3W。在重频18kHz情况下,13.6W输出对应单脉冲能量756μJ,峰值功率138kW,光光效率5.7%,对KTA晶

体来说是迄今为止最高转换效率。

2010年 KIENTLE^[27] 等人报道了一种通过光纤放大增益可变重频的高功率 OPO 激光器(见图 10), 采

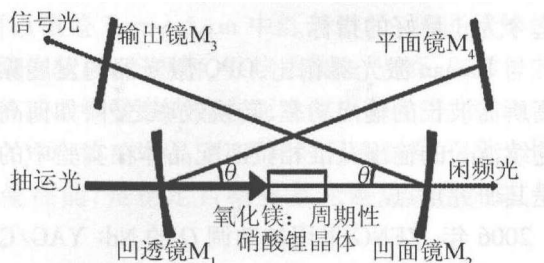


图 10 可变重频高功率硝酸锂光参量振荡器

用掺 MgO 的 LiNdO₃ 晶体输出 1.54 μm 信号光和 3.4 μm 闲频光功率分别为 7.3 W 和 3.1 W, 对应脉宽 17 ps, 重频 114.8 MHz, 这种工作模式最高可达重频可达 1 GHz。

2010年 LIN^[28] 等人报道了一种连续的、不需要晶体温度稳定器的输出瓦量级的红黄蓝光 OPO 激光器(见图 11), 采用 1064 nm Yb 激光器抽运, 内腔和频得

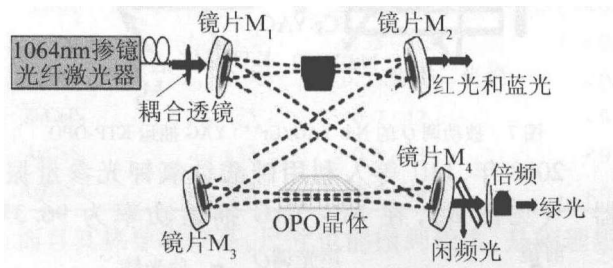


图 11 光纤抽运连续红黄蓝光光参量振荡器

到红光和蓝光, 外腔通过 OPO 得到绿光输出, 在 25 W 抽运功率下得到 633 nm, 532 nm 和 450 nm 输出功率分别为 3.9 W, 0.456 W 和 0.49 W。

3 结束语

结构简单的腔型是未来高效率喇曼激光器的发展趋势, 如内腔式和自喇曼结构, 此类结构腔内元件少, 腔内损耗少, 这对提高喇曼激光器的转换效率至关重要。喇曼激光器内通常有很高的功率密度, 这意味着在喇曼激光器的设计过程中必须要考虑腔内的热透镜效应, 包括激光晶体和喇曼晶体的热透镜效应。关于热透镜效应对于喇曼激光器性能的影响也是未来固体喇曼激光器的重要研究内容。

光参量振荡器是一种具有很大潜力的宽调谐的固体相干辐射源。目前它的发展趋势主要是: 扩展波段(尤其是红外波段); 改进抽运源的性能与抽运方式, 提高参量转换效率; 利用线宽压窄技术压缩线宽; 提高非线性材料的品质因素, 寻求新型非线性材料; 采用新的抽运源; 研制 4 光子参量振荡和皮秒级、飞秒级光参量振荡器等。

光参量振荡器的另一发展趋势是组合调谐。OPO 同倍频、和频、差频甚至受激喇曼散射、染料或固体可调谐激光光源等组合起来, 构成多种方式调谐。

参考文献

- [1] RAMAN C V, KRISHAN K S. A new type of secondary radiation [J]. Nature, 1928, 121: 501-502.
- [2] PASK H M, PIPER J A. Efficient all-solid-state yellow source producing 1.2 W average power [J]. Optics Letters, 1999, 24(21): 1490-1492.
- [3] WANG Z C, DU C L, RUAN S C. Research progress of all-solid-state yellow Lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008(1): 29-36 (in Chinese).
- [4] ARMSTRONG J A, BLOEMBERGEN N, DUNCUING J, et al. Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. Physical Review Letters, 1962, 6(12): 1918-1939.
- [5] WANG C C, RACETTE C W. Measurement of parametric gain accompanying optical difference frequency generation [J]. Applied Physics Letters, 1965, 6(8): 169-171.
- [6] GIORDMARINE J A, MILLER R C. Optical parametric oscillation in the visible spectrum [J]. Applied Physics Letters, 1966, 9(8): 298-300.
- [7] LI C Y, HUANG L, CAI S. Review of nanosecond optical parametric oscillators [J]. Laser Technology, 2003, 27(2): 116-118 (in Chinese).
- [8] CERNY P, JELINKOVA H, ZVEREV P G. Solid state lasers with Raman frequency conversion [J]. Progress in Quantum Electronics, 2004, 28(2): 113-143.
- [9] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002: 564-568 (in Chinese).
- [10] YAO B C, WANG Y Z, WANG Q. Development of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 217-220 (in Chinese).
- [11] MURRAY J T, AUSTIN W L, POWELL R C. Intracavity Raman conversion and Raman beam cleanup [J]. Optical Materials, 1999, 11(4): 353-371.
- [12] FREY R, MARTINO A D, PRADBRE F. High-efficiency pulse compression with intracavity Raman oscillators [J]. Optics Letters, 1983, 8(8): 437-439.
- [13] PIPER J A, PASK H M. Crystalline Raman lasers [J]. IEEE, 2007, 13(3): 692-704.
- [14] PASK H M. The design and operation of solid-state Raman lasers [J]. Progress Quantum Electron, 2003, 27(1): 3-56.
- [15] NIU R H, LI T, ZHANG J W, et al. Research of 3463 nm KTiOAsO₄ optical parametric oscillator at low repetition frequency [J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 351-353 (in Chinese).
- [16] MILDREN R P, PASK H M, PIPER J A. High-efficiency Raman converter generating 1.5 W of red-orange output [R]. Incline Village, Nevada: Optical Society of America, 2006: MC3.
- [17] MILDREN R P, OGILVY H, PIPER J A. Solid-state Raman laser generating discretely tunable ultraviolet between 266 and 320 nm [J]. Optics Letters, 2007, 32(7): 814-816.
- [18] CHEN X H, ZHANG X Y, WANG Q P, et al. Highly efficient diode-pumped actively Q-switched Nd:YAG-SrWO₄ intracavity Raman laser [J]. Optics Letters, 2008, 33(7): 705-707.
- [19] CHANG Y T, HUANG Y P, SU K W. Diode-pumped multi-frequency Q-switched laser with intracavity cascade Raman emission [J]. Optics Express, 2008, 16(11): 8286-8291.

(下转第 379 页)

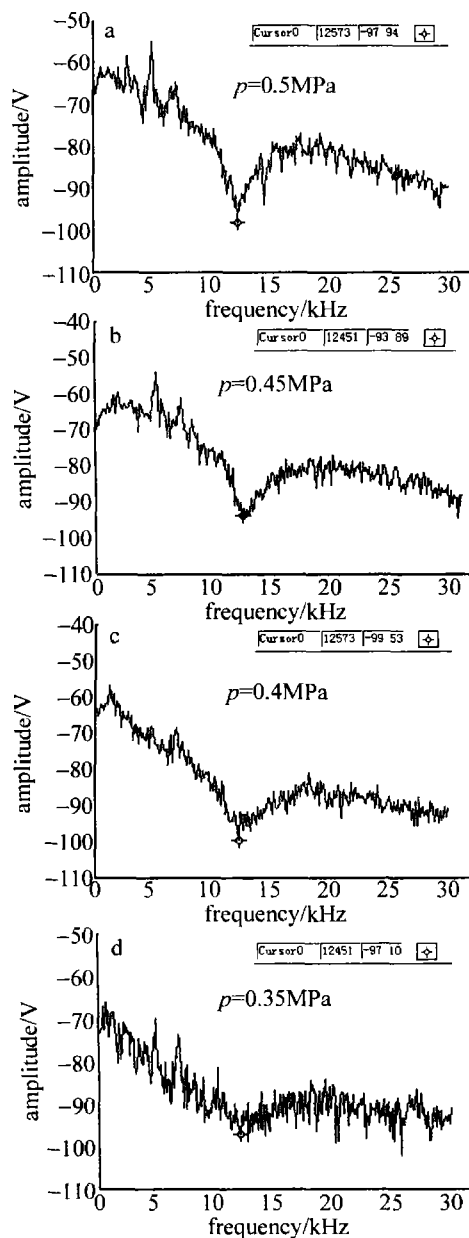


Fig. 4 Null spectrum of leaking signals under different pressure

但必须有足够高的管道压力,才能使泄漏产生的应力波有效调制传输光,从而实现泄漏点定位。

4 结论

研制的分布式光纤管道泄漏监测系统,能有效地实现水下管道泄漏检测,且定位误差在百米以内,因此系统的定位精度可满足实际工程需要。但此系统也存在着不足:当管道内压力较小时,该系统不能实现泄漏点的定位。对于压力较小的管道其检测灵敏度不足,将来可以通过光纤增敏或改变光纤的布放方法来改善系统对小信号的灵敏度,以便提高系统对低压力信号的检测能力。

参考文献

- [1] FUCHS H V, RIEHLE R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis[J]. *Applied Acoustic*, 1999, 33(1):1-19.
- [2] YU D K, QIAO X G, JIA Zh A, *et al.* The fiber Bragg grating temperature and pressure sensing system applied in oil pipeline [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1):12-14 (in Chinese).
- [3] GAO J Zh, JIANG Zh D, ZHAO Y, *et al.* Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(11):633-635.
- [4] LIN W W. Novel distributed fiber optic leak detection system [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(2):278-279.
- [5] LI Zh N, SHEN L, YE X F. Study of polarization-insensitive fiber optic michelson interferometric sensors [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition)*, 2002, 36(1):44-46 (in Chinese).
- [6] WANG Zh H, ZHANG L B, XIN R J, *et al.* Application of acoustic emission technique in pipeline leakage detection [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2007, 31(5):87-90 (in Chinese).
- [7] WASSEF W A, BASSIM M N, HOUSSNY-EMAM M. Acoustic emission spectra due to leaks from circular holes and rectangular slits [J]. *Acoustical Society of America*, 1985, 77(3):916-923.
- [8] KURMER J P. Distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1586:117-128.
- [9] HE C F, HANG L J, WU B. Application of homodyne demodulation system for fiber optic sensors using phase generated carrier based on LabVIEW in pipeline leak detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6150:61502G1-61502G6.
- [10] KUANG W, ZHANG M, WANG L W, *et al.* Data acquisition method for digital phase generated carrier demodulation system of optical fiber interferometers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(8):1086-1090 (in Chinese).

(上接第342页)

- [20] YANG F G, YOU Z Y. End-pumped continuous-wave intracavity yellow Raman laser at 590nm with SrWO₄ Raman crystal [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(1):14-16.
- [21] WANG W, GONG M L. Diode-pumped Q-switched Nd:YAG-KGW Raman laser operating in two-color modulation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(3):2655-2661.
- [22] WANG W, GONG M L. Efficient high-output diode side-pumped electro-optical Q-switched Nd:YAG/KGd(WO₄)₂ Raman laser with conductive and air cooling [J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(4):294-297.
- [23] ZENDZIAN W, JABCZYNSKI J K, WACHULAK P, *et al.* High-repetition-rate, intracavity-pumped KTP OPO at 1572nm [J]. *Applied Physics*, 2004, 80(12):329-323.
- [24] ZENG Q Y, WAN Y, ZHANG B, *et al.* High-repetition-rate intra-

cavity optical parametric oscillator at 1.57 μ m [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6):673-678 (in Chinese).

- [25] LIU Z J. 2.54W 1535nm KTiOAsO₄ optical parametric oscillator within a diode-side-pumped acousto-optically Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Journal of Physics*, 2008, D41(13):5112-5115.
- [26] DONG X L, ZHANG B T, HE J L, *et al.* High-power 1.5 and 3.4 μ m intracavity KTA OPO driven by a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8):1668-1670.
- [27] KIENLE F. High-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8):7602-7610.
- [28] LIN S T. Fiber-laser-pumped CW OPO for red, green, blue laser generation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(3):2361-2367.