

种子注入的全固态单频脉冲激光器研究进展

龙江雄^{1,2*}, 李刚^{1**}, 杨彬², 姚红权², 丁建永², 周军²

¹陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

²南京先进激光技术研究院先进全固态激光技术研发中心, 江苏 南京 210046

摘要 种子注入的全固态单频脉冲激光器具有线宽窄、相干长度长、功率高等特点,是非常适用于多普勒测风雷达、引力波探测、激光光谱学等研究领域的光源,在军事和民用领域应用广泛。从种子注入技术和腔长控制技术两方面综述了国内外种子注入的全固态单频脉冲激光器及相关技术的研究进展,对其未来的发展进行了展望。

关键词 激光器; 全固态激光器; 单频激光器; 种子注入

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090001

Progress in Injection-Seeded All-Solid-State Single-Frequency Pulse Laser

Long Jiangxiong^{1,2*}, Li Gang^{1**}, Yang Bin², Yao Hongquan², Ding Jianyong², Zhou Jun²

¹Department of Electrical and Optical Engineering, Army Engineering University,

Shijiazhuang, Hebei 050003, China;

²Advanced All Solid State Laser Technology R&D Center, Nanjing Institute of Advanced Laser Technology,

Nanjing, Jiangsu 210046, China

Abstract Injection-seeded all-solid-state single-frequency pulse lasers (SFPLs) with narrow linewidth, long coherent length, and high power are desirable laser sources applied in fields such as Doppler wind lidar, gravitational wave detection, and laser spectroscopy. They have wide applications in military and civil fields. The research advancement of the injection-seeded all-solid-state SFPLs and the corresponding techniques are reviewed around injection seeding techniques and cavity length controlling techniques. The prospects of them are discussed.

Key words lasers; all-solid-state laser; single frequency laser; seed injection

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3570

1 引言

单频激光器又称作单纵模激光器,其输出激光光谱范围非常窄,可认为只有单个纵模输出,具有普通激光器不具备的光谱线宽窄、相干长度长的特点。全固态单频激光器实现单纵模输出的方法有短腔法、插入标准具法、双折射滤光片法、耦合腔法、光栅选频法、单向环形腔法和扭转腔模法^[1-7],但这些激光器输出峰值功率相对较低,在许多要求较高峰值功率的场合不适用,而种子注入的单频脉冲激光器由于其峰值功率高和易于实现单纵模的特点,在多普勒测风激光雷达、大气成分测量、相干光通信、引力波探测、太空碎片探测、抽运光参量振荡器等领域是不可或缺的光源^[8-13]。

种子注入的单频脉冲激光器及主振荡放大器(MOPA)是实现较高功率单频激光输出的常用方法。其基本原理是将时间特性和空间特性均非常优良的单频低功率连续激光注入谐振腔中,在抽运脉冲下降沿附近连续改变谐振腔腔长,同时检测种子光与腔内振荡模式的匹配情况,当种子光在腔内谐振时打开Q开关,从而输出近傅里叶转换极限线宽的单频脉冲激光。1984年, Park^[14]将种子注入技术应用于固体激光器,理论分析了单纵模的形成过程,并进行了相关实验,通过将种子光注入调Q的Nd:YAG振荡器内实现了稳定的单纵模输出,并发现只需要很小能量的种子光就能在腔内形成单纵模振荡,增加注入的种子光能量不会改变单纵模调Q输出特性。输出单纵模的频率与种子光频率不完全相

收稿日期: 2018-02-02; 修回日期: 2018-03-29; 录用日期: 2018-04-02

* E-mail: drhero@163.com; ** E-mail: ligangopt@sina.com

同,而是最靠近种子光频率的纵模频率。种子注入技术对输出激光的能量稳定性和频率稳定性起着至关重要的作用,是单频激光器的核心技术。常用的种子注入技术有建立时间最小化技术、谐振探测技术及优化的谐振探测技术,常用的调节腔长的器件有压电陶瓷和电光晶体。本文从以上五个方面出发,结合单频激光器的相关应用分析归纳种子注入的单频脉冲激光器的研究进展。

2 种子注入技术

2.1 建立时间最小化技术

种子注入从动腔实现单频激光输出的要点在于控制谐振腔长度使腔内振荡模式的频率与种子光频率匹配,两者越接近,越容易实现单纵模输出,脉冲建立时间(指从 Q 开关触发时刻到实际脉冲产生时刻经过的时间)越小。Rahn 根据这一现象提出并应用了建立时间最小化技术^[15],将低功率 Nd:YAG 单频种子光注入从动腔,通过比较偶数脉冲和奇数脉冲建立时间调节腔长,使谐振腔输出脉冲的建立时间保持最小。上海光学精密机械研究所于 2006 年报道了运用建立时间最小化技术研制的用于直接多普勒测风雷达的单频 Nd:YAG 激光器^[16],该激光器能够产生 1064 nm 单脉冲,能量 20 mJ,重复频率 100 Hz。在 2 h 内维持单纵模输出的概率为 99%,受环境干扰的影响有 1% 的概率输出多纵模激光,这是建立时间最小化技术的一个缺点。2007 年,Schroder 等^[17]使用建立时间最小化技术,结合主振荡功率放大技术及高阶谐波产生技术,设计了用于机载多普勒测风激光雷达的种子注入 Nd:YAG 单频紫外激光器,该激光器输出 1064 nm 激光脉冲能量 10 mJ,重复频率 100 Hz,脉冲持续时间 35 ns,通过拍频测得的线宽小于 15 MHz,14 s 内的频率稳定性均方根值为 1.3 MHz,经过两级双程放大器和非线性晶体后,输出 355 nm 紫外激光脉冲能量 60 mJ,脉冲宽度减小到 25 ns。通过脉冲建立时间最小化技术得到的奇数脉冲和偶数脉冲的建立时间始终存在差别,对应的线宽也存在差别,为保证输出激光频率稳定性,抽取脉冲建立时间最小的奇数脉冲或偶数脉冲作为最终输出脉冲,因此所设计的主振荡器重复频率应为实际重复频率的两倍,相应的能量转换效率也因此降低。该技术虽然对压电陶瓷和电路控制系统的要求相对简单,但容易受到干扰,不能保证稳定的单频输出,适用于频率稳定性要求低且干扰小的情况。由于易受环境干扰,该技

术在之后的发展中逐渐被其他技术所取代。

2.2 Ramp-fire 谐振探测技术

1986 年, Henderson 等^[18]提出扫描-触发(Ramp-fire)谐振探测技术,该技术的基本原理如图 1 所示。注入谐振腔的种子光第一次通过偏振片 P 时,垂直偏振分量反射到腔外,水平偏振光经过 M2 和 M1 反射后两次经过相当于四分之一波片的偏振控制器(PC)变为垂直偏振,第三次经过偏振片 P 时被反射出腔外,调节入射种子光的偏振态使得反射的两束光强度相当,从而产生对比度较强的干涉波形。在每一个抽运脉冲持续时间内,对固定在谐振腔腔镜上的压电陶瓷(PZT)施加线性斜坡扫描电压来改变 PZT 的厚度,从而改变谐振腔腔长,用光电二极管实时探测干涉情况,当检测到干涉峰值时,此刻谐振腔产生的纵模频率与种子光频率匹配,打开 Q 开关即可输出单纵模激光。

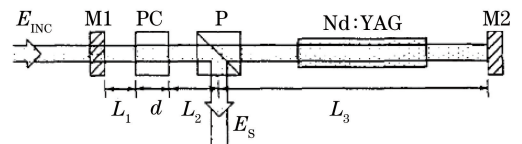


图 1 Ramp-fire 谐振探测技术工作原理示意图

Fig. 1 Operation schematic of ramp-fire resonance detection technique

1991 年, Fry 等^[19]利用 Ramp-fire 谐振探测技术设计了种子注入的电光调 Q Nd:YAG 激光器,输出脉冲能量约为 100 mJ,脉冲重复频率 10 Hz。经测试在高噪声、高振动的环境中仍然能保持单频输出。但由于调 Q 脉冲的触发时间不固定,脉冲之间的时间间隔不断变化,输出脉冲能量不稳定。2006 年,上海光学精密机械研究所周军等^[20]在种子注入的单频 Nd:YAG 中运用 Ramp-fire 谐振探测技术,实现了单脉冲能量 20 mJ、重复频率 100 Hz 的单纵模 1064 nm 激光输出,产生单纵模的概率为 100%,但输出激光的能量稳定性仍有提升空间。2013 年,陆婷婷等^[21]利用 Ramp-fire 谐振探测技术结合腔内倍频实现了基于 Nd:YAG 晶体的脉冲能量 6.3 mJ、脉冲重复频率 1 kHz 的单频 532 nm 绿光激光器,该激光器能够直接应用于各种类型激光雷达。2017 年,北京理工大学高春清课题组研制了种子注入的 Ho:YAG 单频激光器^[22],用线宽约为 10 kHz 的光纤耦合输出的 Ho:YAG 单块非平面环形腔(NPRO)激光器作为种子源,从动腔是连续 Tm:YLF 激光器抽运的声光调 Q 蝶型四镜环形腔,运用 Ramp-fire 谐振探测技术实现了稳定的

2.09 μm 单纵模激光输出, 输出激光脉冲能量 6.24 mJ, 脉宽 172 ns, 重复频率 1 kHz, 用拍频法测得光谱线宽为 2.61 MHz, 能量稳定性小于 3%, 该能量稳定性指标还有可提升的空间。

Ramp-fire 谐振探测技术相比建立时间最小化技术而言, 虽然在控制电路的设计方面要求较高, 实现更难, 但输出的激光拥有更高的频率稳定性, 且抗干扰能力更强, 能保证 100% 单纵模输出, 适用于重复频率较高的激光器。但由于这种技术没有任何的反馈机制, 干涉信号相对抽运脉冲的时序不能保持稳定, Q 开关的每次触发时间不固定, 造成输出的单频激光能量不稳定, 因此相继提出了不断改进的 Ramp-fire 谐振探测技术。

2.3 Ramp-hold-fire 谐振探测技术

为解决 Ramp-fire 谐振探测技术因调 Q 触发信号不稳定造成的输出激光能量抖动的问题, 科研人员在其基础上进行了改进。1997 年, Larsen 等^[23] 提出了基于 Ramp-fire 谐振探测技术的扫描-保持-触发(Ramp-hold-fire)谐振探测技术。这种技术的原理类似于 Ramp-fire 谐振探测技术, 不同点在于当检测到干涉峰值后, 并不立即打开 Q 开关, 而是使加在压电陶瓷上的扫描电压保持在检测到干涉峰值时的电压, 此时从动腔的纵模频率一直与种子光频率保持一致, 直到调 Q 触发信号的到来, 该技术原理如图 2 所示。2001 年, Walther 等^[24] 将 Ramp-hold-fire 谐振探测技术运用于种子注入三角形环形谐振腔钛宝石激光器, 输出单频 761.1 nm 红光, 脉冲能量 25 mJ, 脉冲持续时间 35 ns, 光谱线宽 12.5 MHz。

近年来, 北京理工大学运用这种技术研制了不同类型的单频激光器。2016 年, 高春清课题组运用 Ramp-hold-fire 谐振探测技术研制了种子注入的单

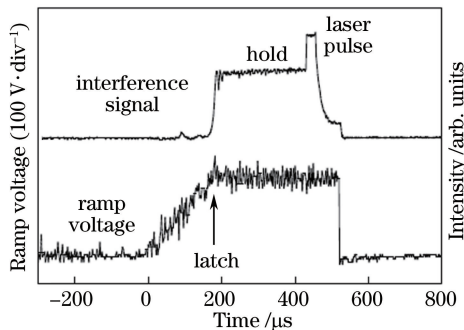


图 2 Ramp-hold-fire 谐振探测技术原理图

Fig. 2 Schematic of ramp-hold-fire resonance detection technique

频 Er:YAG 多晶陶瓷激光器, 实现了单脉冲能量 4.7 mJ、脉冲宽度 250 ns、重复频率 200 Hz、线宽 2.52 MHz 的 1645 nm 单频激光输出^[25]。同年, 他们利用这种技术研制了 2.09 μm 种子注入的单频 Ho:YAG 陶瓷激光器, 该激光器输出脉冲能量 14.76 mJ, 脉宽 121.6 ns, 重复频率 200 Hz, 在 1 h 内测得线宽 3.84 MHz, 这是第一台种子注入的单频 Ho:YAG 陶瓷激光器^[26]。2017 年, 他们研制了脉冲能量和重复频率可调的高重复频率 Ho:YAG 激光器^[27], 利用 NPRO Ho:YAG 单频激光器作为种子源, 通过声光 Q 开关注入折叠形从动腔, 输出的激光经过单程放大器进行放大, 最终得到脉冲能量 12.7~31.4 mJ 可调、对应脉冲持续时间范围为 102~215 ns、重复频率在 150~750 Hz 范围内可调的单频 Ho:YAG 激光器。Ramp-hold-fire 谐振探测技术虽然改善了激光输出能量的稳定性, 但损失了探测即触发的实效性, 在保持阶段不能避免外界干扰的影响, 而且保持期间压电陶瓷的非线性效应和机械振铃效应^[28] 会导致腔长发生不规则改变, 进而影响谐振腔与种子光的匹配精度。

2.4 带反馈的谐振探测技术

为进一步提升输出激光能量的稳定性, 尽可能避免外界干扰的影响, Ertel 等^[29] 在 2005 年提出了带反馈的谐振探测技术, 这种技术的 Q 开关触发信号时间点是固定的, 通过加入反馈信号响应外界干扰来提高种子光干涉信号的时间稳定性, 使其干涉峰值尽可能稳定在 Q 开关触发信号的时间点。图 3 所示为偏置电压反馈的谐振探测技术原理图, 通过测量干涉信号峰值相对 Q 开关触发信号的时间差改变压电陶瓷的电压, 使干涉信号峰值始终保持在触发信号的时间点。这种方法虽然能改善输出激光能量稳定性, 但是将反馈偏压和扫描电压加载在同

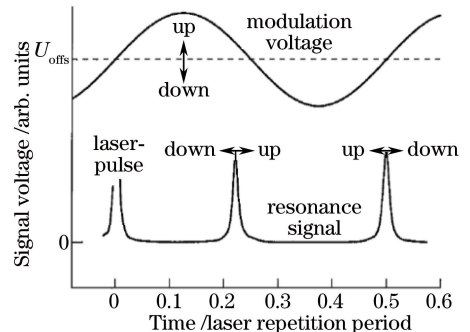


图 3 偏置电压反馈的谐振探测技术原理图

Fig. 3 Schematic of resonance detection technique with bias voltage feedback

一个 PZT 上,对 PZT 的工作状态会产生影响,若外界干扰较大,突然加载的反馈偏压使得 PZT 发生长度上的突变,影响其使用寿命。

2007 年,中科院上海光学精密机械研究所周军等^[30]提出了延迟-扫描-触发(Delay-ramp-fire)谐振探测技术,其基本原理如图 4 所示。该技术与 Ramp-fire 谐振探测技术的不同之处在于扫描电压的起始时刻相对于抽运脉冲的起始时刻 t_1 不是固定不变的,而是根据每一个周期内的出光时间 t_2 进行调整,即将上一个周期内的 t_2 与 t_0 之差反馈给当前周期斜坡电压的起始时刻 $t_1 = t_1 - (t_2 - t_0)$,从而保证调 Q 触发信号始终在抽运脉冲的下降沿前后,提高了输出激光的能量稳定性。一年后,他们又对该方案进行了改进,提出了偏压反馈的双 PZT 谐振探测技术^[31],其原理如图 5(a) 所示。采用两个

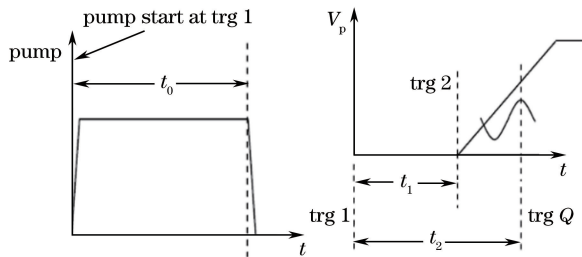


图 4 Delay-ramp-fire 谐振探测技术原理图

Fig. 4 Schematic of delay-ramp-fire resonance detection technique

PZT,其中一个加载梯形扫描电压,另一个加载直流偏置电压,根据 Q 开关触发信号的产生时刻相对抽运脉冲起始时刻的延时变化改变偏置电压的值,使脉冲产生时刻相对稳定,从而提升输出激光能量的稳定性。由于扫描电压和反馈偏压分别加载在两个 PZT 上,因此,谐振探测过程和反馈过程彼此独立,使得 PZT 在较高重复频率下能稳定工作,对电路硬件及软件的要求相对较低,且抗干扰能力更强。2011 年,王君涛等^[32]利用该技术研制了脉冲能量 8 mJ、重复频率 1 kHz、脉冲持续时间 11 ns 的单频 Nd:YAG 激光器,线宽约为 54.2 MHz,2 min 频率抖动小于 3.5 MHz。

2016 年,高永飞等^[33]基于偏压反馈的双 PZT 谐振探测技术,结合实时谐振跟踪探测方法,提出了一种新的种子注入技术——偏压反馈的双 PZT 正弦扫描谐振探测技术,其原理如图 5(b) 所示。在后端镜的 PZT 上加载正弦扫描电压,为避免 PZT 的非线性效应的影响,必须保证在每个扫描周期内的正弦信号初始相位为零而且与抽运脉冲上升沿同步。由于正弦信号的光滑特性,扫描电压不会发生突变,从而最大限度地减小机械振铃效应。利用该技术研制的单频激光器输出激光脉冲能量 0.7 mJ,脉冲宽度 27 ns,重复频率 400 Hz,测得线宽为 18 MHz,30 min 内频率抖动小于 9.1 MHz,相比文献^[32],频率稳定性有了较高的提升。

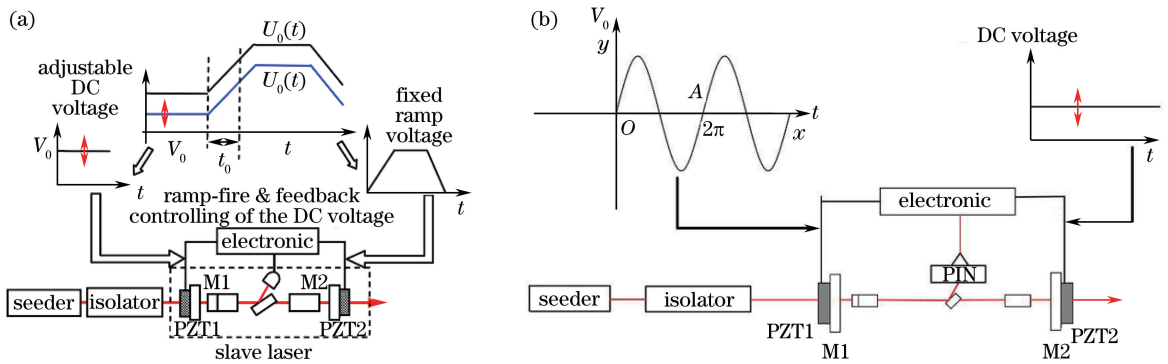


图 5 偏置电压反馈的双 PZT 谐振探测技术原理图。(a) 梯形扫描;(b) 正弦扫描

Fig. 5 Schematic of dual-PZT resonance detection technique with bias voltage feedback.

(a) Ladder ramp; (b) sinusoidal ramp

在频率稳定性控制方面,PDH(Pound-Drever-Hall)注入锁定技术表现优异,在干扰较大的环境中输出的激光频率仍能保持较好的稳定性。该技术基于 PDH 稳频技术^[34]加以改进,其原理如下:种子源激光经射频相位调制后注入从动腔,当种子光与从动腔模式不匹配时,相应的电路系统产生一个误差

信号,该误差信号驱动 PZT 控制电路,调整 PZT 使从动腔模式始终与种子源匹配,从而输出频率稳定的单纵模激光。2000 年,Brewer 等^[35]利用 PDH 注入锁定技术研制的相干多普勒激光雷达光源长期频率稳定度小于 2.6 kHz/h,在振动环境中的短时间频率稳定均方根值达到了 0.2 MHz,其结构原理如

图6所示,种子光(LO beam)经过相位调制器(PM)后成为携带射频边带信号的载波光信号,经声光调制器(AOM)注入L型从动腔,InGaAs探测器DET1探测种子光谐振信号,DET2探测载波信号、边带信号和腔内谐振信号,DET2探测的信号经一系列处理后产生误差信号来驱动PZT控制电路锁定腔长。2014年,Gibert等^[36]研制的双波长单频Ho:YLF激光器采用了PDH注入锁定技术,输出激光频率稳定性标准差为2 MHz,10 s内的频率抖动范围小于70 kHz,非常适用于差分吸收雷达来探测大气CO₂浓度。

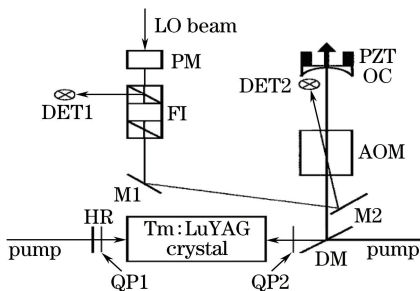


图6 PDH注入锁定技术结构原理图

Fig. 6 Schematic of PDH injection locking technique

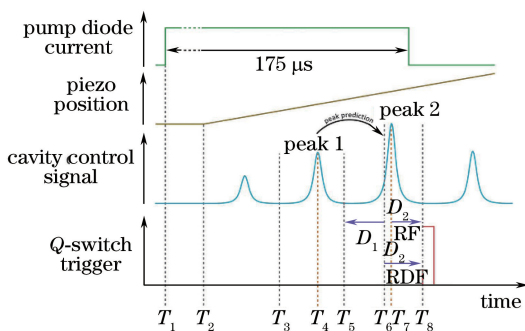


图7 RDF谐振探测技术触发机制原理图

Fig. 7 Schematic of trigger mechanism of the RDF resonance detection technique

经过多年的发展,出现了不同类型的带反馈的谐振探测技术,每种方法各具优势,适用环境及条件也有所差别。近年来,这几种技术在各类种子注入的单频激光器中都有使用。但无论哪种谐振探测技

术,都没有对脉冲建立时间内外界干扰引起的腔长变化进行控制,在此期间腔长的微小变化会影响输出激光的单频特性,因此,排除这种可能的影响会增加激光器稳定单频输出的可靠性。

在测风雷达领域,单频激光源频率稳定性越高,风速测量越准确,脉冲触发时间间隔越稳定精确,风场的距离测量越准确。2017年,德国航空航天中心Lemmerz等^[37]报道了用于机载测风雷达的全固态紫外激光器,该激光器采用主振荡放大结构,结合I类LBO倍频晶体和II类LBO和频晶体,输出脉冲能量60 mJ、脉冲持续时间20 ns、重复频率50 Hz的355 nm紫外激光。机载测风雷达的回光探测器对激光脉冲产生的时间精度要求较高,为满足这一要求,同时保证激光源在各种条件下输出激光的频率稳定,采用了扫描-延迟-触发(Ramp-delay-fire, RDF)谐振探测技术并建立触发时间和频率稳定的单纵模脉冲激光。图7所示为RDF谐振探测技术触发机制原理图, T_1 为抽运开始时间, T_2 为PZT扫描电压起始时间,在固定的时刻 T_3 开始峰值检测, T_4 时刻检测到第一个峰值。为了在脉冲产生前的精确时刻触发雷达的回光探测器,根据 T_3 与 T_4 的差值预测下一个脉冲的触发时间 T_6 ,以确定触发回光探测器的时间 T_5 ,在延迟时间 D_2 内改变腔长,以补偿这段时间内(包括脉冲建立时间)PZT引起的腔长变化。这种方法能够很好地减小Ramp-fire技术因外界干扰引起的脉冲时间抖动,最终实现频率和时间均稳定的单频激光发射源。

种子注入技术已广泛应用于各类不同波长的单频脉冲激光器中,为更好地了解种子注入技术的发展历程,将其重要时间节点总结在图8中。采用PZT控制腔长的种子注入技术已经比较成熟,是工程上实现单频激光器常用的技术,但其适用性和可靠性还有待提高,在重复频率较高(如大于1 kHz)的工作条件下,对PZT的控制难度大,对相应的电路控制系统要求较高,因此通过PZT控制腔长来实现高重复频率的单频激光器难度较大。

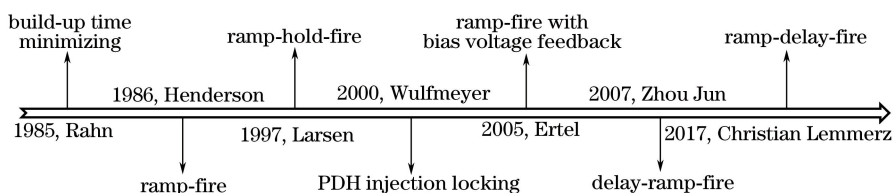


图8 种子注入技术发展历程

Fig. 8 Development history of injection seeding technology

3 基于电光晶体的腔长调节技术

电光晶体折射率大,光学均匀性好,损耗低,抗损伤阈值高,与PZT相比,在高重复频率的种子注入单频脉冲激光器应用中具有不可替代的优势。1998年,Nicolaescu等^[38]提出将电光晶体插入种子注入的谐振腔内,通过在晶体上加载斜坡扫描电压控制腔长,电压的改变只引起相位的变化而不会改变光的偏振态,利用这种在腔内插入电光晶体调谐腔长的技术成功将文献^[39]得到的40 MHz的线宽优化到14 MHz,并提到了文献^[39]中最终没有得到窄线宽的原因是PZT无法响应增益介质在抽运脉冲时间内的腔长动态变化,这种方法能够有效地弥补腔长相位调制的频率啁啾。磷酸氧钛铷(RTP)晶体电光系数高,驱动电压低,是很好的腔长调节元件。2005年,Hovis等^[40]采用RTP晶体代替PZT来调谐腔长,该晶体沿 x 轴方向切割,沿 z 轴方向施加正弦电压,腔长随着电压的改变而变化,利用谐振探测技术的峰值检测技术触发Q开关,实现单纵模输出。但实验结果显示输出激光出现跳模现象,这主要是因为短时间内温度变化引起的腔长变化使调Q触发的时间与检测到峰值信号的时间不同步。2012年,Moore等^[41]利用KD*P晶体作为相位调制器调谐腔长,采用Ramp-hold-fire谐振探测技术建立单纵模振荡,研制了傅里叶转换极限线宽的20 ns脉冲钛宝石激光器,但KD*P晶体电光系数较低,需要的驱动电压较大。

在应用电光晶体调谐腔长建立单纵模振荡方面,上海光学精密机械研究所对不同电光晶体的应用进行了研究,并研制了相应的单频激光器。2014年,张俊旋等^[42]将铌酸锂(LN)晶体插入从动腔中,采用Delay-ramp-fire谐振探测技术建立单纵模振荡,输出激光最高脉冲能量4.8 mJ,重复频率400 Hz,在输出脉冲能量3.5 mJ条件下的脉冲宽度为25 ns,光束质量因子 $M^2 < 1.3$,测得线宽约为21.2 MHz,2 min频率稳定性均方根值为1.7 MHz,文献^[32]使用PZT调谐腔长得到的这一指标为3.5 MHz,结果证明,在激光稳频特性方面,使用电光晶体调谐腔长比使用PZT更具优势。一年后,他们采用RTP晶体作为腔内相位调制器,同样采用Delay-ramp-fire谐振探测技术得到了2 min频率稳定性均方根值为1.5 MHz的单频激光^[43]。2017年,他们利用同样的电光晶体和谐振探测技术获得了线宽30 MHz、频率抖动小于1.4 MHz的双脉冲

电光调Q单频激光器^[44]。

用电光晶体代替PZT调谐腔长能够得到线宽稳定性和频率稳定性更加优异的单频激光器,对于不同峰值功率的激光器应选择具有合适损伤阈值的电光晶体,用电光晶体在工程上实现稳定的单频激光器具有广阔的前景。

4 结束语

在今后的工程应用中,基于PZT调谐腔长的种子注入技术仍然具有很好的应用前景,生产成本低,相应的控制技术相对成熟。如何优化压电陶瓷的控制方法和谐振探测电路的稳定性,以提高工程应用的激光器的频率稳定性和激光器的寿命,是未来的发展方向。另外,电光晶体控制腔长的方法不会引入机械振铃及非线性效应,且响应速度快,精度高,在控制输出激光频率稳定性和线宽稳定性方面更具优势,寻找电光系数高、损伤阈值高的电光晶体对于研究高重复频率、高峰值功率、系统稳定的激光器具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Yao B Q, Liu X L, Yu L X, *et al.* Resonantly pumped single frequency Er:YAG laser at 1645 nm [J]. *Laser Physics*, 2011, 22(2): 403-405.
- [2] Merriam A J, Yin G Y. Efficient self-seeding of a pulsed $Ti^{3+} : Al_2O_3$ laser [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 1034-1036.
- [3] Chen Y F, Huang T M, Wang C L, *et al.* Theoretical and experimental studies of single-mode operation in diode pumped Nd:YVO₄/KTP green laser: influence of KTP length [J]. *Optics Communications*, 1998, 152(4/5/6): 319-323.
- [4] Zhou F, Ferguson A I. Tunable single frequency operation of a diode laser pumped Nd:YAG microchip at 1.3 μm [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(7): 490-491.
- [5] Zayhowski J J, Mooradian A. Single-frequency microchip Nd lasers [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(1): 24-26.
- [6] Kane T J, Byer R L. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Optics Letters*, 1985, 10(2): 65-67.
- [7] Evtuhov V, Siegman A E. A "twisted-mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(1): 142-143.

- [8] Yang H L, Meng J Q, Ma X H, *et al.* Compact and high-energy diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG slab laser system for space application[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(12): 121406.
- [9] Razenkov I A. Aerosol lidar for continuous atmospheric monitoring [J]. Atmospheric and Oceanic Optics, 2013, 26(4): 308-319.
- [10] Zhou J, Long X W. Laser Doppler velocimeter using a single longitudinal mode solid-state laser source[J]. Optics & Laser Technology, 2010, 42(7): 1167-1171.
- [11] Frede M, Wilhelm R, Gau R, *et al.* High-power single-frequency Nd:YAG laser for gravitational wave detection[J]. Classical & Quantum Gravity, 2004, 21(5): S895-S901.
- [12] 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.
- [13] Li M L, Gao L, Shi W Z, *et al.* Progress in all-solid-state single-frequency lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080003.
李梦龙, 高龙, 史文宗, 等. 全固态单频激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080003.
- [14] Park Y K, Giuliani G, Byer R L. Single axial mode operation of a Q-switched Nd:YAG oscillator by injection seeding [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1984, 20(2): 117-125.
- [15] Rahn L A. Feedback stabilization of an injection-seeded Nd:YAG laser[J]. Applied Optics, 1985, 24(7): 940-942.
- [16] Zhou J, Yu T, Bi J Z, *et al.* Diode pumped injection seeded Nd:YAG laser [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(5): 292-293.
- [17] Schröder T, Lemmerz C, Reitebuch O, *et al.* Frequency jitter and spectral width of an injection-seeded Q-switched Nd:YAG laser for a Doppler wind lidar[J]. Applied Physics B, 2007, 87(3): 437-444.
- [18] Henderson S W, Yuen E H, Fry E S. Fast resonance-detection technique for single-frequency operation of injection-seeded Nd:YAG lasers [J]. Optics Letters, 1986, 11(11): 715-717.
- [19] Fry E S, Hu Q, Li X. Single frequency operation of an injection-seeded Nd:YAG laser in high noise and vibration environments[J]. Applied Optics, 1991, 30(9): 1015-1017.
- [20] Zhou J, Zang H G, Yu T, *et al.* A compact diode-pumped injection seeded Nd:YAG laser with resonance-detection technique [J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(4): 947-949.
- [21] Lu T T, Wang J T, Zhu X L, *et al.* Highly efficient single longitudinal mode-pulsed green laser [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(5): 051402.
- [22] Na Q X, Gao C Q, Wang Q, *et al.* 1 kHz single-frequency 2.09 μm Ho:YAG ring laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(25): 7075-7078.
- [23] Fry E S, Thomas E, Larsen M P, *et al.* Injection seeding of a Ti:sapphire laser using a ramp-hold-fire technique[C]//Proceedings of the Lasers and Electro-Optics, 1997: 362-363.
- [24] Walther T, Larsen M P, Fry E S. Generation of Fourier-transform-limited 35-ns pulses with a ramp-hold-fire seeding technique in a Ti:sapphire laser[J]. Applied Optics, 2001, 40(18): 3046-3050.
- [25] Ye Q, Gao C Q, Wang S, *et al.* Single-frequency, injection-seeded Q-switched operation of resonantly pumped Er:YAG ceramic laser at 1645 nm [J]. Applied Physics B, 2016, 122(7): 198.
- [26] Zhang Y X, Gao C Q, Wang Q, *et al.* Single-frequency, injection-seeded Q-switched Ho:YAG ceramic laser pumped by a 1.91 μm fiber-coupled LD [J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27805-27811.
- [27] Wang Q, Gao C Q, Na Q X, *et al.* Single-frequency injection-seeded Q-switched Ho:YAG laser [J]. Applied Physics Express, 2017, 10(4): 042701.
- [28] Guyomar D, Aurelle N, Eyraud L. Piezoelectric ceramics nonlinear behavior. Application to Langevin transducer[J]. Journal de Physique III, 1997, 7(6): 1197-1208.
- [29] Ertel K, Linne H, Bosenberg J. Injection-seeded pulsed Ti:sapphire laser with novel stabilization scheme and capability of dual-wavelength operation [J]. Applied Optics, 2005, 44(24): 5120-5126.
- [30] Zhou J, Yu T, Liu J Q, *et al.* Development of single-frequency laser for direct-detection wind lidar [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6681: 66810R.
- [31] Zhou J, Zang H G, Liu D, *et al.* Frequency doubled single-longitudinal-mode Nd:YAG laser for remote sensing [C] // 24th International Laser Radar Conference, 2008: 133-136.
- [32] Wang J T, Zhu R, Zhou J, *et al.* Conductively cooled 1-kHz single-frequency Nd:YAG laser for remote sensing[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(8): 081405.

- [33] Gao Y F, Zhang J X, Zang H G, *et al.* Stable single-mode operation of injection-seeded Q-switched Nd:YAG laser by sine voltage modulation[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(7): 071401.
- [34] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, *et al.* Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. Applied Physics B, 1983, 31(2): 97-105.
- [35] Brewer A, Randall M, Hardesty R M, *et al.* 2- μm Doppler lidar transmitter with high frequency stability and low chirp[J]. Optics Letters, 2000, 25(17): 1228-1230.
- [36] Gibert F, Edouart D, Cénac C, *et al.* 2- μm high-power multiple-frequency single-mode Q-switched Ho:YLF laser for DIAL application[J]. Applied Physics B, 2014, 116(4): 967-976.
- [37] Lemmerz C, Lux O, Reitebuch O, *et al.* Frequency and timing stability of an airborne injection-seeded Nd:YAG laser system for direct-detection wind lidar[J]. Applied Optics, 2017, 56(32): 9057-9068.
- [38] Nicolaescu R, Walther T, Fry E S. Linewidth narrowing of a pulsed alexandrite laser by intracavity phase modulation[C]//Proceedings of the Lasers and Electro-Optics, 1998: 179-180.
- [39] Bösenberg J, Wulfmeyer V. Single-mode operation of an injection-seeded alexandrite ring laser for application in water-vapor and temperature differential absorption lidar[J]. Optics Letters, 1996, 21(15): 1150-1152.
- [40] Hovis F E. Single-frequency 355 nm source for direct detection wind lidar[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5653: 198-209.
- [41] Moore T Z, Anderson F S. Generating multiple wavelengths, simultaneously, in a Ti:sapphire ring laser with a ramp-hold-fire seeding technique[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8235: 82351M.
- [42] Zhang J X, Zhu X L, Zang H G, *et al.* Injection seeded single-frequency pulsed Nd:YAG laser resonated by an intracavity phase modulator[J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7241-7245.
- [43] Zhang J X, Zhu X L, Ma X H, *et al.* Stable seeder-injected Nd:YAG pulsed laser using a RbTiOPO₄ phase modulator[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(11): 111404.
- [44] Zhang J X, Zhu X L, Zang H G, *et al.* Double-pulse single-longitudinal-mode operation of injection-seeded laser using intracavity phase modulator[J]. Optical Engineering, 2017, 56(4): 046105.