

266 nm 紫外激光波长标准装置的研制

张洪喜 朱兴邦 刘志明 王少水

(中国电子科技集团公司第 41 研究所, 山东 青岛 266555)

摘要 采用双波长固体激光器与碘分子饱和吸收稳频技术及环形腔谐振倍频技术相结合的方案研制了 266 nm 紫外激光波长标准。双波长固体激光器输出的 532 nm 激光入射到碘分子吸收稳频系统, 稳频系统提供一个稳定的参考频率, 如果 532 nm 激光的频率偏离该参考频率, 稳频系统会产生反馈信号, 该反馈信号通过伺服控制系统, 调节单块激光器的腔长, 使 532 nm 激光频率稳定在稳频系统提供的参考频率上。由于该 532 nm 激光是由激光谐振腔输出的 1064 nm 激光单次通过 PPKTP 倍频晶体得到, 所以上述稳频过程同时也保证了 1064 nm 激光频率的稳定。单块双波长固体激光器输出的稳定的 1064 nm 激光经过两次二倍频产生频率稳定的 266 nm 紫外激光输出。

关键词 激光器; 双波长固体激光器; 外腔倍频; 稳频; 非线性光学

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.s102009

Development of 266 nm Ultraviolet Laser Wavelength Standard Device

Zhang Hongxi Zhu Xingbang Liu Zhiming Wang Shaoshui

(The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Company,
Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract Dual-wavelength solid laser pumped Nd:YAG in miser configuration combined with the iodine absorption frequency stabilization technology and the external cavity-enhanced second harmonic generation technology is constructed to develop 266 nm ultraviolet (UV) laser wavelength standard device. The iodine absorption frequency stabilizing system read by a single dual-wavelength solid-state laser of 532 nm can give a reference frequency. When the output frequency of the 532 nm laser departs from the reference frequency, the cavity length of this laser will be controlled by a feedback signal from the iodine absorption frequency stabilizing system through a servo control system, so that the output frequency of the 532 nm can be locked to the reference frequency provided by the frequency stabilizing system. Because the laser at 532 nm is obtained from the frequency-doubled 1064 nm laser through PPKTP frequency doubling crystal, the frequency stability of the laser at 1064 nm can be assured. The single dual-wavelength solid-state laser of 1064 nm can provide a frequency stable UV laser output at 266 nm through double frequency doubling process.

Key words lasers; double wavelength solid laser; external cavity-enhanced second harmonic generation; frequency stabilization; nonlinear optics

OCIS codes 140.3610; 190.2620; 120.4800; 250.0040; 040.5160

1 引 言

随着科学技术的不断进步和计量技术的不断发展, 在光学实验和实际应用领域中波长计和光谱仪作为必不可少的通用计量设备已司空见惯。人们期望作为测量设备的波长计和光谱仪能够在更大的光谱范围内计量更加准确。校准波长计和光谱仪通常

使用已知的单一光学波长标准频段标定, 目前国家计量院已经有 1064 nm 红外激光波长标准、633 nm 可见红光激光波长标准和 532 nm 可见绿光激光波长标准, 但在紫外波长附近的激光波长标准目前还是空白。

紫外激光由于波长短, 能量更集中, 分辨率更

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-09-01

作者简介: 张洪喜(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电子计量方面的研究。E-mail: eiqd@ei41.com

高,在国防、超微细加工、金属探伤、光生物学、环境监测、高分辨率光谱学等领域具有广泛的应用前景,因此建立紫外激光波长标准是非常必要的。

紫外激光波长标准是近几年才提出的一个课题。在激光波长(频率)标准中,光学频率的稳定是将作为光源的激光器发出激光束的光学频率稳定在作为自然基准的特定粒子的适当跃迁上。由于532 nm激光波长与碘分子吸收光谱相符合,在所符合的光谱范围内,有着丰富的由基态起始跃迁的纯净谱线^[1]。本文结合双波长固体激光器技术、碘分子吸收稳频技术和环形腔谐振倍频技术等多项关键技术,以固体环形激光器1064 nm作为激光光源,单次通过PPKTP倍频晶体产生532 nm绿激光,利

用腔外碘饱和吸收技术,以碘分子的谱线R(56)32-0的 a_{10} 超精细谱线为参考^[2],将532 nm激光频率稳定在其超精细 a_{10} 分量上,产生的误差信号反馈到单块固体环形激光器谐振腔的压电陶瓷和控温装置上,使得1064 nm激光频率保持稳定,再经过两次高转换效率的二倍频转换,成功实现了266 nm紫外标准波长激光的输出。经拍频实验测量,碘稳频532 nm激光的频率稳定性优于 6×10^{-11} 。

2 总体方案

266 nm紫外激光波长标准装置主要由单块双波长固体激光器、碘分子吸收稳频系统、倍频系统1、倍频系统2及伺服控制系统组成,其总体流程如图1所示。

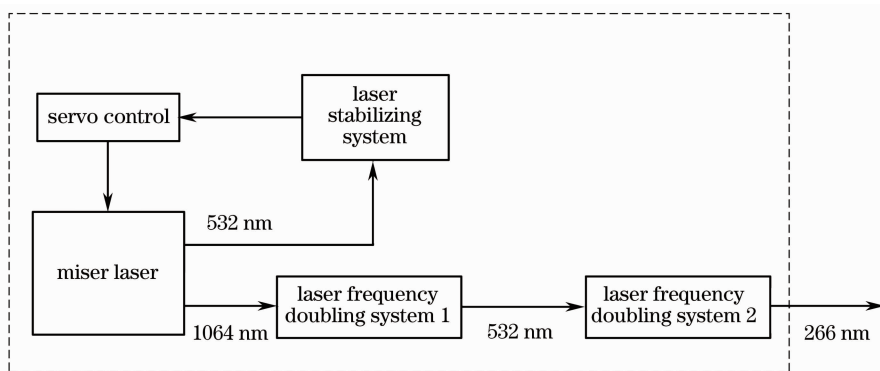


图1 266 nm激光标准波长示意图

Fig. 1 Configuration of 266 nm laser wavelength standard

双波长固体激光器输出的532 nm激光入射到碘分子吸收稳频系统,稳频系统提供一个稳定的参考频率,如果532 nm激光的频率偏离该参考频率,稳频系统会产生反馈信号,该反馈信号通过伺服控制系统,调节激光器的腔长,使532 nm激光频率稳定在稳频系统提供的参考频率上,保证532 nm激光频率的稳定。由于该532 nm激光是由激光谐振腔输出的1064 nm激光单次通过PPKTP倍频晶体得到的,所以上述稳频过程同时也保证了1064 nm激光频率的稳定。双波长固体激光器输出的稳定的1064 nm激光通过倍频系统1产生532 nm激光,再通过倍频系统2产生266 nm的紫外激光。由于1064 nm激光、532 nm激光频率均稳定,所以经过两次倍频最终产生的266 nm紫外激光的频率也会保持稳定。

3 分系统设计

3.1 双波长固体激光器设计

固体激光器是一种非常巧妙的构思,它集单向

环形腔优良的单模特性与单块腔极好的稳定性于一身构造而成,其产生532 nm和1064 nm双波长激光的流程如图2所示。

固体激光器为双波长输出,其中一个波长是单频的1064 nm红外激光,另一个波长是将上述单频1064 nm激光单次通过PPKTP倍频晶体而产生的532 nm倍频光。固体激光器的光路系统如图2所示,808 nm半导体激光二极管A、B发射的激光经偏振合束棱镜(PBS)合光后入射到密封单块谐振腔中,激励键合Nd:YAG单块晶体,产生1064 nm近红外激光^[3]。分束棱镜(BS1)对808 nm抽运光高透射,对1064 nm激光高反射。经BS2透射的1064 nm激光入射到噪声抑制单元中,使用光电反馈噪声抑制电路,实现激光强度噪声的有效抑制。经BS2反射的1064 nm激光经过 $\lambda/4$ 波片作偏振态调整后,经过聚焦透镜lens3进入PPKTP倍频晶体,倍频后的光束经过准直透镜lens4实现准直和光束空间分布形状的调整。BS3对1064 nm的激光高透射,对532 nm倍频光高反射,用于将532 nm倍

频光和 1064 nm 基频光在空间上分开,从而分别输出,其中 532 nm 倍频光入射到碘分子吸收稳频系统,用于将 532 nm 激光频率锁定到碘分子 R(56) 32-0 超

精细结构中的 a_{10} 分量频率上进行稳频;另外的 1064 nm 基频光入射到倍频系统 1 中,用于产生高稳定、高功率输出的 532 nm 倍频谐振光。

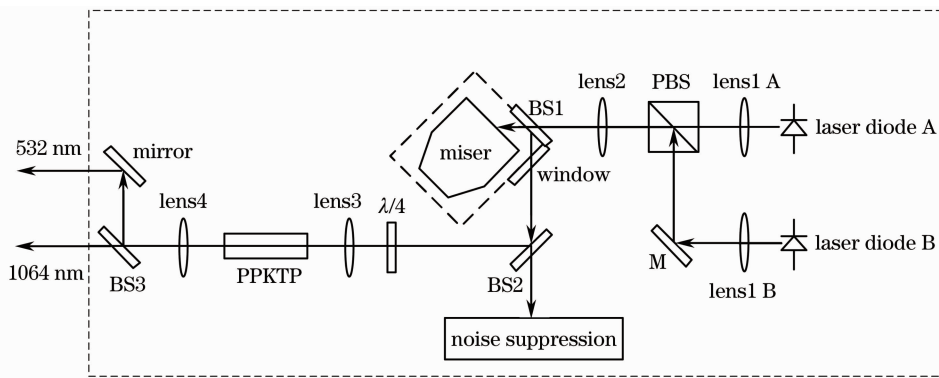


图 2 双波长固体激光器产生 532 nm 和 1064 nm 双波长激光示意图

Fig. 2 Configuration of the dual-wavelength (532 nm, 1064 nm) solid laser

3.2 碘分子饱和和吸收稳频系统设计

对 532 nm 的激光进行稳频,常用的是饱和吸收稳频法,以碘元素的超精细谱线的频率作为参考

频率进行稳频^[4]。稳频装置采用碘气体分子的超精细谱线中的吸收谱线的频率作为参考频率进行稳频,其稳频原理如图 3 所示。

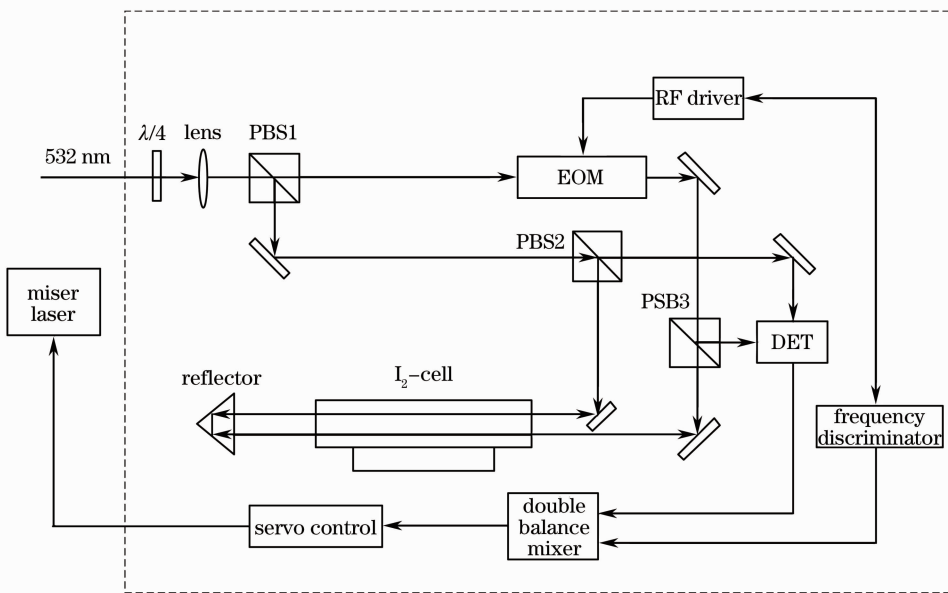


图 3 激光稳频系统示意图

Fig. 3 Configuration of laser stabilizing system

532 nm 激光经过 $\lambda/4$ 波片和透镜实现空间偏振态调整后,由 PBS1 分为偏振方向相互垂直的两束光,其中一束经过电光调制器(EOM)进行调制,另一束激光未调制,两束光反向进入碘室,通过控温装置保持碘室温度稳定,在碘室中,两束光产生非线性四波混频,实现边带由调制光束向未调制光束的转移^[5]。未调制光束和新产生的边带经 PBS3 进入光电差分探测器(DET),通过双平衡混频器解调并与本振信号混频,得到误差信号。该误差信号经过

伺服控制电路系统,分为快慢环路两部分。快环部分反馈控制激光器谐振腔上的压电陶瓷,通过改变应力从而改变激光器谐振腔的腔长,调整激光的输出频率,实现激光器快速小范围的跟踪与锁定。慢环部分反馈在单块谐振腔的控温系统上,通过改变单块谐振腔的温度改变激光的谐振频率,从而实现激光频率的大范围的锁定^[6]。伺服控制系统同时利用快环反馈的快速跟踪特性和慢环反馈的大范围锁定特性,最终将激光器的频率稳定在参考频率上。

3.3 倍频系统设计

固体激光波长都工作在近红外区,直接产生短波长的激光非常困难,采用非线性频率变换获得紫外激光是非常有效的方法。

激光倍频分为腔外倍频和腔内倍频,腔内倍频可以获得较高的能量转换效率,而腔外倍频易于实现。本文采用分离元件环形腔腔外倍频,从根本上避免了直接的光反馈,避免了加工困难,能够实现大

范围调谐,同时又容易实现激光频率的锁定。近年来,利用准相位匹配途径获得高效倍频光的技术引起了人们越来越多的关注,例如 PPKTP、PPLN、PPKN 等晶体。特别引人注意的是 PPKTP 倍频晶体,它对 1064 nm 至 532 nm 的激光倍频而言,其工作温度接近室温,并且它综合的光学、物理、化学特性,使其成为一种人们非常感兴趣的倍频晶体。倍频系统 1 的原理如图 4 所示。

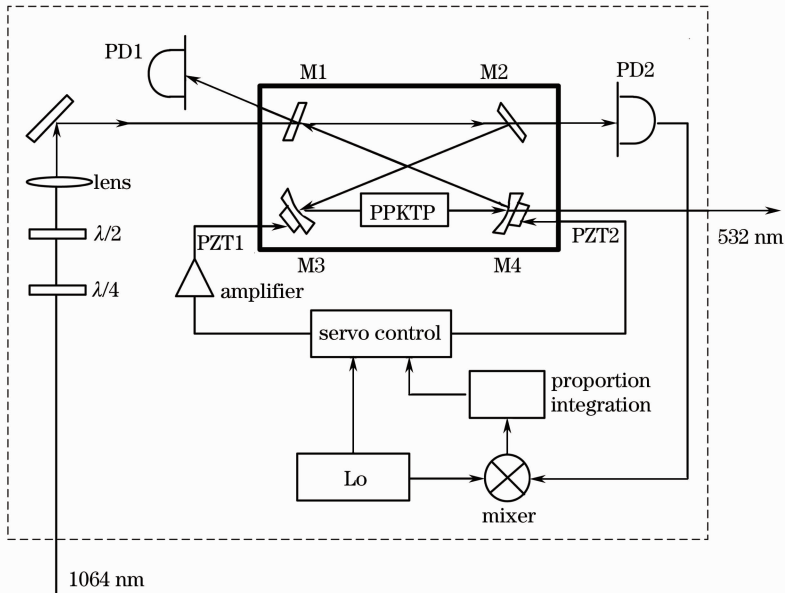


图 4 激光倍频系统示意图

Fig. 4 Configuration of laser frequency doubling system

1064 nm 基频椭圆偏振光经过 $\lambda/4$ 波片和 $\lambda/2$ 波片转换成线偏振光,实现空间偏振态匹配。匹配透镜将 1064 nm 基频光耦合到环形倍频腔体内,实现空间模式匹配。环形腔由平面反射镜 M1、M2 和凹面反射镜 M3、M4 组成、其中 M1 为耦合镜,用于实现基频光束从腔外到腔内的耦合,其透射率经过特殊选择,以实现“阻抗匹配”。反射镜 M2、M3、M4 对基频光具有高反射率,其中 M4 同时对倍频光具有高透射率,以便实现 532 nm 倍频光的有效提取。图中的光电探测器 PD1 和 PD2 用于监视倍频腔激光波长与谐振腔共振波长之间的失调。失调时产生的误差信号经伺服控制电路系统处理,并反馈到倍频腔压电陶瓷的驱动器上,通过压电陶瓷(PZT)的伸缩调节腔长,实现倍频腔与激光器之间的跟踪和锁定。在激光频率与倍频腔共振频率梳中的某一频率一致时,腔内光功率由于谐振作用而获得增强,产生远大于单次通过倍频晶体时的 532 nm 倍频光功率。

倍频系统 2 和倍频系统 1 的原理类似,图 4 中

将 PPKTP 晶体换成 BBO 晶体,并且系统中匹配透镜焦距、束腰大小、聚焦因子等参数都需要重新计算,最终产生远大于单次通过倍频晶体时的 266 nm 倍频光功率。

4 频率稳定度测量

研制的 266 nm 紫外光频标是由 532 nm 光频标碘稳频激光器输出的红外 1064 nm 光经腔外四倍频得到的,因此 532 nm 碘稳频光频标的频率稳定性和不确定性决定了 266 nm 光频标的频率稳定性和不确定性。

532 nm 碘稳频光频标与另一台进口高稳定 532 nm 激光器进行拍频测量^[7],由于该进口激光器的频率稳定度为 10^{-13} 量级,因此它们之间相互拍频测量结果的阿伦方差反映的是 532 nm 碘稳频光频标的频率稳定度。图 5 为测量的阿伦方差曲线,其 1~10000 s 的阿伦方差优于 6×10^{-11} 。

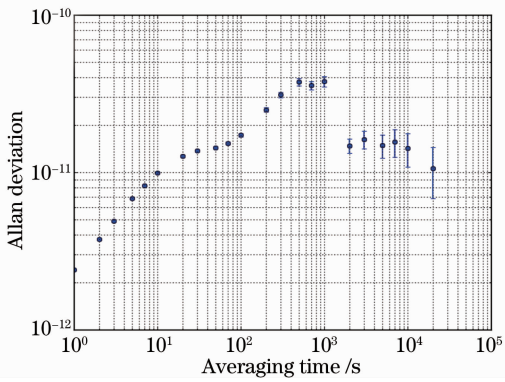


图5 拍频测量的阿伦方差曲线

Fig. 5 Allan deviation curve of beat frequency measurement

5 结 论

采用双波长固体激光器与碘分子饱和吸收稳频技术及环形腔倍频技术相结合,研制了 266 nm 紫外稳频激光标准装置,其输出的 532 nm 稳频激光的频率稳定性优于 6×10^{-11} 。经过大量实验和缜密分析,若能在系统中增加声光调制单元,将会削弱剩余光反馈的影响,从而使光频标的频率稳定性得到

进一步提高。下一步准备进行这方面的研究工作。

参 考 文 献

- 1 J L Hall, L S Ma, M Taubman, *et al.*. Stabilization and frequency measurement of the I₂-stabilized Nd:YAG laser[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1999, 48(2): 585-586.
- 2 J Ye, L Robertsson, S Picard, *et al.*. Absolute frequency atlas of molecular I₂ lines at 532 nm[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1999, 48(2): 544-548.
- 3 Zang Erjun, Cao Jianping, Zhong Mingchen, *et al.*. Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(3): 336-339. 臧二军, 曹建平, 钟明琛, 等. 用单块激光器和环形外腔获得稳定的 532 nm 激光[J]. 光学学报, 2003, 23(3): 336-339.
- 4 L Robertsson, L S Ma, S Picard. Improved iodine-stabilized Nd:YAG lasers[C]. SPIE, 2001, 4269: 268-270.
- 5 Bi Zhiyi, Luo Ming, Ding Jingxin, *et al.*. Modulation transfer spectrum using Nd:YVO₄ minilaser[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(12): 1699-1703. 毕志毅, 罗明, 丁晶新, 等. 微型 Nd:YVO₄ 激光器在碘分子调制转移光谱中的应用[J]. 光学学报, 2000, 20(12): 1699-1703.
- 6 E A Whittker, M Gehrtz, G C Bjorklund. Residual amplitude modulation in laser electro-optic phase modulation[J]. J Opt Soc Am B, 1985, 12(8): 1320-1325.
- 7 M L Eickhoff, J L Hall. Optical frequency standard at 532 nm[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1995, 44(2): 155-158.

栏目编辑: 宋梅梅