

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1486-03

# 低温下半导体激光器注入锁定产生的可调谐压缩光\*

陶 桦 刘 涛 张 靖 谢常德 彭堃巍

(山西大学光电研究所,量子光学教育部重点实验室,太原 030006)

摘要: 利用钛宝石激光器注入锁定低温(80 K)下的半导体激光器获得了低于散粒噪声极限 1.1 dB、调谐范围为 13 GHz 的强度压缩光,并且在实验上与光栅反馈所产生的强度压缩光进行了比较。

关键词: 强度压缩光;钛宝石激光器;注入锁定

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## 1 引 言

强度压缩光<sup>[1]</sup>(光子数压缩光)的光子数起伏低于散粒噪声极限,因此它的高灵敏度光谱、精密测量和量子信息等有着广泛应用。目前,强度压缩光已可通过抑制半导体激光器抽运噪声<sup>[2~6]</sup>和二次谐波过程<sup>[7,8]</sup>,抑制半导体激光器抽运噪声产生强度压缩光具有方便、高效、实用的特点,因而更受人们关注。实验上可以通过高阻恒流源驱动的半导体激光器,利用光栅反馈、注入锁定等压窄线宽技术实现强度压缩<sup>[2~6]</sup>。

本文主要利用钛宝石激光器注入锁定低温下的半导体激光器,得到了压缩度为 1.1 dB、调谐范围为 13 GHz 的可调谐强度压缩光,而且可通过直接调节钛宝石激光器的波长来实现对压缩光频率的调节。与低温下半导体激光器光栅反馈产生的强度压缩光相比,所测强度压缩基本一致,但采用注入锁定可以同时注入锁定几个半导体激光器,产生几束相位相干的强度压缩光。两束相位相干的强度压缩光通过 50% 分束器耦合可产生量子纠缠光束,用在连续变量的隐形传态和密集编码等实验中<sup>[9]</sup>。由于低温下准直透镜和半导体激光器的双折射效应影响平衡零拍探测强度压缩光的准确性,我们加入倾斜放置的半波片及偏振棱镜来补偿双折射效应,从而提高了散粒噪声基准和压缩光的探测的准确性<sup>[10]</sup>。

## 2 实验装置及结果

由于半导体激光器中存在低于阈值的边带纵

模,要获得强度压缩必须通过压窄线宽技术(line-narrowing techniques)来抑制边模。首先用光栅反馈得到强度压缩光,实验装置如图 1 所示。

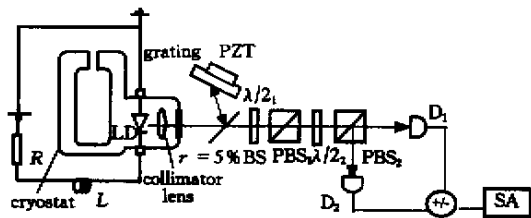


Fig. 1 Experimental setup for external grating feedback. LD: laser diode; PZT: piezo-electric transducer controlling grating; BS: beam splitter; PBS: polarization beam splitter; SA: spectrum analyzer;  $\lambda/2$ : half-wave plate

为了提高半导体激光器的量子转换效率,把半导体激光器(SDL-5411-G1)和准直透镜置于装有液氮的保温瓶中,温度为 80 K。由于半导体激光器的相位噪声对于被选择波长的反馈非常敏感,所以很弱的反馈就足以抑制边模。我们使用反射率较小的分光镜( $r = 5\% \sim 10\%$ ),将小部分光反射到光栅(1200 l/mm)上。光栅由压电陶瓷(PZT)控制,光栅的一级衍射光被反馈到半导体激光器上。半导体激光器输出具有偏振性,平行于半导体激光发射结(laser junction)的偏振方向输出较强,而垂直偏振方向由于具有很大的内腔损耗,输出接近阈值,缺少饱和增益,因此它的强度噪声远高于散粒噪声基准,与弱边带纵模特性一致。在室温下,半导体激光器输出平行偏振光和垂直偏振光的强度比为 100:1;在低温下输出偏振光的强度比变为 10:1,这正是由于在低温下半导体激光器和准直透镜的双折射效应使输出光变为了椭圆偏振光。当线偏振器引入光路中时,激光的正交偏振分量投影到线偏振器的输出偏

\* 国家自然科学基金(60178012)资助课题。

收稿日期:2001-04-09

振方向上产生干涉,主偏振分量耦合了垂直偏振方向上大的噪声分量,降低了其强度压缩,因此可通过加入仰俯可调的半波片1和偏振棱镜1来补偿低温下半导体激光器和准直透镜的双折射效应<sup>[10]</sup>。半波片2和偏振棱镜2组成一个50%的偏振分束器,输出的两束偏振垂直的光由两个光电二极管(FND-100)进行平衡零拍探测。探测到的直流部分通过电压表测量,保证两臂光电流直流部分相等。交流部分输入到加减法器中,加减法器输出端与谱仪(HP-8590L)相连。当加减法器为“-”时,为散粒噪声基准;为“+”时,为半导体激光器输出的强度噪声。半导体激光器由恒流源驱动(505, Newport Corp.)。在80 K时,阈值电流为2.8 mA;在驱动电流为32.85 mA时,半导体激光器波长为812.496 nm,探测到的光电流为13.2 mA,电光转换效率为40%。调节光栅使一级衍射光与半导体激光器输出光较好地重合,再通过压电陶瓷对光栅进行微调,从谱仪上可以得到在15 MHz~25 MHz上有1.0 dB的压缩,如图2中曲线b所示,曲线a为散粒噪声基准。

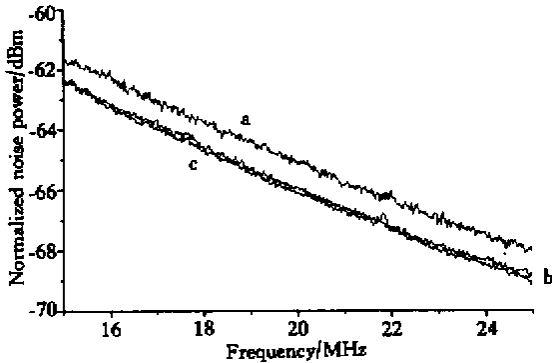


Fig.2 The measured noise spectra with external grating feedback and injection locking respectively from 15 MHz to 25 MHz. a: Shot-limit (SNL); b: With external grating feedback; c: With injection locking of Ti:sapphire laser. Parameters of spectrum analyzer: Resolution bandwidth (RSW): 100 kHz; Video bandwidth (VBW) 300 Hz

利用钛宝石激光器注入锁定得到可调谐强度压缩光的实验,装置如图3所示。钛宝石激光器(MBR-110, Coherent Inc.)具有调谐宽(694 nm~990 nm)线宽窄(小于100 kHz)稳定性好的特点。在钛宝石激光器前加光隔离器,以防反馈光进入激光器中。通过半波片4和偏振棱镜4分出少量的光(约10 mW)用于法布里-珀罗腔监视模式。然后再通过半波片3和偏振棱镜3得到垂直偏振光,通过反射率较小的分光镜进入半导体激光器中。采用与

图1一样的光路来探测。反射镜1、2用于测量钛宝石激光器输出光的波长(开始时,使其波长与半导体激光器输出波长一致)。波长计置于偏振棱镜1的另一输出端(如图3所示)。钛宝石激光器输出波长为812.496 nm的红外光约120 mW,用于注入半导体激光器的功率为3 mW~4 mW。半导体激光器的状态与光栅反馈时相同。在钛宝石激光器输出光模式稳定的情况下,调节光路,使注入光与出射光很好地重合。在此情况下,用平衡零拍探测。所测光电流为13.36 mA,基本与光栅反馈时一致。交流成分通过加减法器输入到谱仪中,此时测得的散粒噪声基准与光栅反馈时测得的一致,如图2中曲线a所示;可得到1.1 dB的强度压缩光,如图2中曲线c所示。通过直接调节钛宝石激光器输出光的波长,在812.489 nm~812.519 nm范围内均可得到1.1 dB的强度压缩光。即通过调节钛宝石激光器输出光的波长,我们得到调谐范围为13 GHz的可调谐强度压缩光。

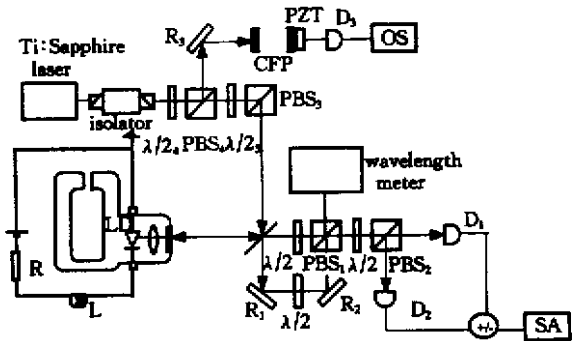


Fig.3 Experimental setup for injection locking of Ti:sapphire laser at low temperature. CFP: confocal Fabry-Perot cavity; OS: oscilloscope

通过以上实验我们可以得出,调整光栅可以微调反馈产生的强度压缩光频率,但调谐范围小,而且影响压缩度;用钛宝石激光器注入锁定的方法,可以很方便地通过调节钛宝石激光器输出光的波长来实现强度压缩,而不用改变半导体激光器的状态,并且压缩度保持不变。

事实上,由于实际应用中仅仅一束强度压缩光是不够的。如连续变量的隐形传态和密集编码的实现都需要两束相位相干的强度压缩光<sup>[9]</sup>。这可以通过把钛宝石激光器输出光同时注入锁定两个状态相同的半导体激光器来产生。而对于光栅反馈来讲,不能同时产生几束相位相干的强度压缩光。

结论 通过用钛宝石激光器注入锁定低温下的半导体激光器得到了压缩度为1.1 dB、调谐范围为

13 GHz的连续可调谐强度压缩光。它的主要特点有：

1) 可通过直接调节钛宝石激光器输出光的波长来实现强度压缩光频率的调节；

2) 可把钛宝石激光器输出光同时注入锁定几个半导体激光器中,产生几束相位相干的强度压缩光,用于连续变量的隐形传态和密集编码实验。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Yamamoto Y , Machida S , Nilsson O . Amplitude squeezing in a pump-noise-suppressed laser oscillator. *Phys. Rev. ( A )* , 1986 , **34** ( 4 ) : 4025 ~ 4042
- [ 2 ] Machida S , Yamamoto Y , Itaya Y . Observation of amplitude squeezing in a constant-driven semiconductor laser. *Phys. Rev. Lett.* , 1987 , **58** ( 10 ) : 1000 ~ 1003
- [ 3 ] Wang H , Freeman M J , Steel D G . Squeezed light from injection-locked quantum well lasers. *Phys. Rev. Lett.* , 1993 , **71** ( 24 ) : 3951 ~ 3954
- [ 4 ] Zhang T C , Poizat J P , Grelu P *et al.* . Quantum noise of free-running and external-stabilized laser diodes. *Quant. Semiclassic. Opt.* , 1995 , **7** ( 4 ) : 601 ~ 613
- [ 5 ] Zhang Tiancai , Hou Zhanjia , Wang Junmin *et al.* . Generation of intensity squeezing in laser diode by weak external cavity feedback. *Chin Phys. Lett.* , 1996 , **13** ( 10 ) : 734 ~ 736
- [ 6 ] Richardson W H , Machida S , Yamamoto Y . Squeezed photon-number noise and sub-Poissonian electrical partition noise in a semiconductor laser. *Phys. Rev. Lett.* , 1991 , **66** ( 22 ) : 2867 ~ 2870
- [ 7 ] Pereira S F , Xiao M , Kimble H J *et al.* . Generation of squeezed light by intracavity frequency doubling. *Phys. Rev. ( A )* , 1988 , **38** ( 9 ) : 4931 ~ 4934
- [ 8 ] Li R D , Kumar P . Quantum-noise reduction in traveling-wave second-harmonic generation. *Phys. Rev. ( A )* , 1994 , **49** ( 10 ) : 2157 ~ 2166
- [ 9 ] Zhang Jing , Peng K . Quantum teleportation and dense coding by means of bright amplitude-squeezed light and direct measurement of a bell state. *Phys. Rev. ( A )* , 2000 , **62** ( 6 ) : 064302-1 ~ 064302-4
- [ 10 ] Zhang Jing , Zhang Tiancai , Dong Ruifang *et al.* . Influence of birefringence induced at low temperature upon balanced detection of polarization-dependent photon-number squeezing and its optical compensation. *J. Opt. Soc. Am. ( B )* , 2001 , **18** ( 7 ) : 1014 ~ 1018

## Generation of Tunable Amplitude-Squeezed Light by Injection Locking a Laser Diode at Low Temperature

Tao Hua Liu Tao Zhang Jing Xie Changde Peng Kunchi

( *Institute of Opto-Electronics , Shanxi University , The Key Laboratory of Quantum Optics , Ministry of Education , Taiyuan 030006* )

( Received 9 April 2001 )

**Abstract :** Tunable amplitude-squeezed light is experimentally generated at low temperature ( 80 K ) in a laser diode with light injection locking from Ti : sapphire laser. The amplitude squeezing of the output light from the laser diode can be obtained at 1.1 dB ( lower than shot noise limit ) throughout a tunable range 13 GHz. The amplitude-squeezed light generated by injection locking is compared with that by external grating feedback.

**Key words :** amplitude-squeezed light ; Ti : sapphire laser ; injection locking