

用自滤波及注入锁定提高铜蒸气激光在 BBO 晶体中的倍频效率

任 虹 梁培辉 沈琪敏 叶 韧

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

提要 本文采用自滤波非稳腔振荡和注入锁定放大的铜蒸气激光系统, 获得了发散角为 0.22 mrad, 偏振度为 93%, 510.6 nm 线输出功率为 9.2 W 的激光束。将这一光束聚焦到长 9 mm 的 BBO 晶体中, 获得了 1.2 W 的倍频光, 其转换效率为 13%, 当移去滤波小孔后, 所产生的倍频效率下降到 8%。

关键词 铜蒸气激光器, 二次谐波, 自滤波, 注入锁定

Improved efficiency of second harmonic generation in BBO using copper vapor laser with self-filtering and injection-locking

REN Hong, LIANG Peihui, SHEN Qimin, YE Ren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract Adopting a copper vapor laser system consisting of a self-filtering unstable resonator and an inject ion-locked amplifier, the output power of 9.2 W on 510.6 nm line with polarization degree of 93% and about six times as large as diffraction-limited divergency was obtained. Focusing the laser beam into a 9 mm long BBO crystal, the second harmonic of 1.2 W was generated with conversion efficiency of 13%. When the filtering aperture was removed, the conversion efficiency fell down to 8%.

Key words copper vapor laser, second harmonic generation, self-filtering, injection-locking

1 引 言

铜蒸气激光器(CVL)是一种高效率、高重复频率的金属蒸气激光器,将它与具有优良特性的非线性光学晶体——BBO晶体结合,由此产生的倍频光是一种新型的紫外相干光源,它在医学、工业、光化学及光生物学等领域有重要的应用价值,尤其是应用于光刻。自1984年首次用CVL在BBO晶体中产生倍频光以来^[1],各国都相继对此进行了深入的研究^[2,3]。由于CVL有较

大的发散角, BBO 晶体较小的相位匹配角宽度限制了倍频效率的提高。因此增加在衍射极限发散角内的铜蒸气激光功率是提高倍频效率的有效方法之一。最近发展的带有自滤波非稳腔(SFUR)的 CVL 可获得接近衍射极限发散角的激光束, 但输出功率较低^[4]。本文通过自滤波振荡, 注入锁定放大的 CVL 系统, 获得了发散角接近衍射极限的高平均功率输出, 从而提高了 CVL 在 BBO 晶体中的倍频效率。

2 实验装置及实验条件

我们采用两台不同口径的自加热式纯铜激光器组成自滤波振荡、注入锁定放大的激光系统, 实验装置如图 1 所示。振荡器及放大器的放电管的内径及电极间距分别为 $\phi 20 \times 580 \text{ mm}$ 及 $\phi 34 \times 890 \text{ mm}$ 。CVL 放电重复频率为 6 kHz。CVL 输出的脉冲信号由光电二极管接收, 倍频光脉冲信号由 R955 型光电倍增管接收, 用宽带示波器观察两者的脉冲波形。我们采用“套孔法”测量光束的方向性曲线, 并定义光束发散角为包含输出光总功率 80% 所对应的全角发散角。本文所指的衍射极限角为全角, $\theta = 2.44(\lambda/D)$ 。基频光功率及倍频光功率都采用 Coherent 公司制造的 LM100 型功率计测量。

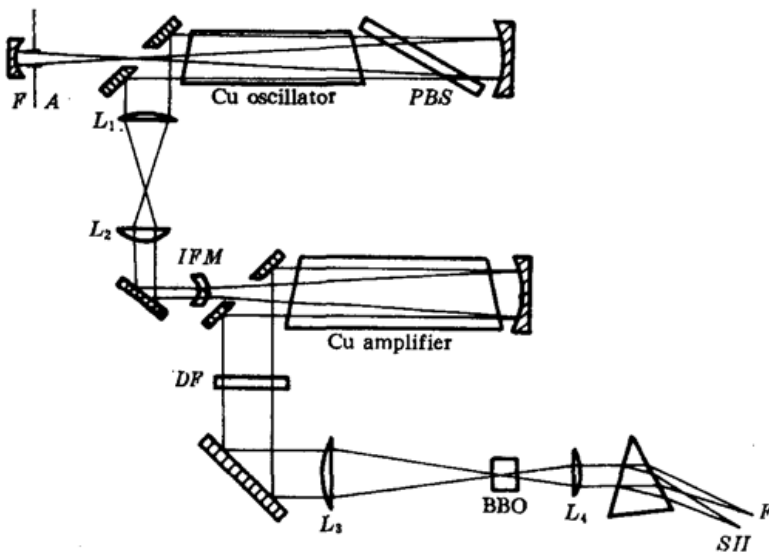


Fig. 1 Experimental setup

F : Fundamental light at 510.6 nm;

SH : Second harmonic light at 255.3 nm;

DF : Dichroic filter which transmits the green laser beam and reflects the yellow one;

PBS : Polarizing beam splitter;

IFM : Injection feedback mirror;

FA : Filtering aperture

3 自滤波非稳腔振荡器

为了获得接近衍射极限发散角的激光, 在振荡器中选用放大倍率为 70 的负支非稳腔, 并将直径为 0.2 mm 的滤波小孔紧靠在曲率半径为 50 mm 的后腔板前, 组成一个改型的自滤波非稳腔。这种改型的自滤波非稳腔与滤波小孔放在焦点处的普通型自滤波非稳腔相比有两个优点: 1) 能使腔内光束充满激光管的管径, 提高输出光功率; 2) 能降低滤波小孔的定位精度, 即降低滤波小孔位置的微小偏移对输出光功率及方向性的影响。激光输出采用一块镀全反膜的带有直径为 1.5 mm 小孔的 45°斜孔板。振荡器输出光脉冲波形为单峰结构, 如图 2 所示。为了获得偏振光输出, 我们在曲率半径为 3.5 m 的前腔板后插入一块镀起偏膜的平板。输出光的偏振度达到了 98%。为了将自滤波非稳腔与移去滤波小孔后的负支非稳腔(NBUR)的输出光进行比较, 在相同实验条件下, 我们分别测量了两者输出光的方向性曲线, 如图 3 所示; 两者的输出光功率分别为 0.87 W 及 1.76 W。图 3 表明: 1) 在非稳腔中加上滤波小孔后, 输出光的发散角明显减小, 由 0.23 mrad 降到 0.14 mrad(约二倍衍射极限); 2) 自滤波非稳腔的输出光在衍射极限发散角内所占的功率百分比远大于不用滤波小孔的非稳腔, 并且在衍射极限

发散角内的绝对功率值也大于不用滤波小孔的非稳腔。

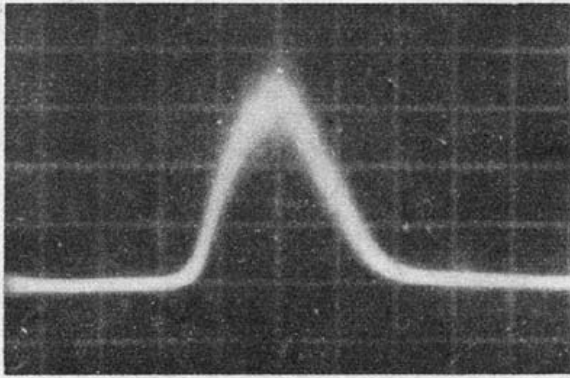


Fig. 2 Pulse profile of the oscillator with self-filtering unstable resonator
Time scale : 10 ns/div

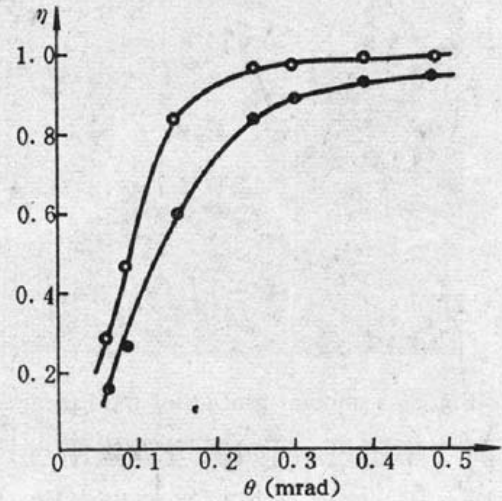


Fig. 3 Divergency plots for oscillators with a self-filtering unstable resonator (- o) and negative branch unstable resonator (- ·)

4 注入锁定放大器

振荡器的输出光经 1:6 的缩孔望远镜后,通过一块半透半反的腔片匹配注入到带有放大倍率为 10 的正支非稳腔的放大器中,这种放大器我们称作注入锁定放大器,它的前、后腔板的曲率半径分别为 5 m 及 0.5 m,放大器的输出采用一块镀全反膜的带有 4 mm 小孔的 45°斜孔板。通过控制振荡器与放大器之间的触发延时,我们获得了发散角为 0.22 mrad(约 6 倍衍射极限),偏振度为 93%,黄、绿光总输出功率大于 15 W 的激光,绿光的方向性曲线如图 4 所示,输出光脉冲波形如图 5(a) 所示。类似的注入锁定放大器在文献[5]中已有较详细的描述。

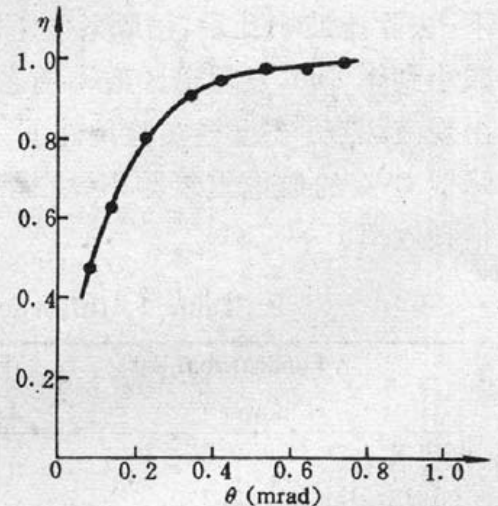


Fig. 4 Divergency plot for the injection-locked amplifier. Injected signal-0.16 W

5 利用 BBO 晶体的铜蒸气激光倍频

我们在口径为 34 mm 的放大器的输出端放置一块透绿(510.6 nm)反黄(578.2 nm)的镀膜平板,并用一块焦距为 1.8 m 的透镜将绿光聚焦到长 9 mm 的未镀膜的 BBO 晶体中进行倍频。BBO 晶体不仅具有相对高的非线性光学系数,而且有高的破坏阈值和低的吸收率。当采用波长为 510.6 nm 的基频光时,BBO 晶体的相位匹配角为 50.6°,离散角为 4.9°。BBO 晶体相位匹配的容许角宽是很小的,在我们的实验条件下,相位匹配的容许角宽为 0.38 mrad,它与绿光的会聚角度 19 mrad 相比是非常小的。但这并不能说,大部分光均属浪费。根据 T. Omatsu 等人提出的 CVL 产生二次谐波的非共线相互作用模型^[3]:相对光轴大体成对称方向行进的二个光波相互耦合,产生二次谐波,其结果是二次谐波并非只是满足一种相位匹配条件,而是满足非共线相位匹配条件的许多光线对生成的各分量的总和。CVL 的倍频效率虽然随基频光峰值功率密度的提高而提高,但其最高功率密度受 BBO 晶体的破坏阈值的限制。而在相同功率密度情况下,CVL 的倍频效率又随基频光会聚角的减小而提高。因此减小会聚透镜焦距虽然

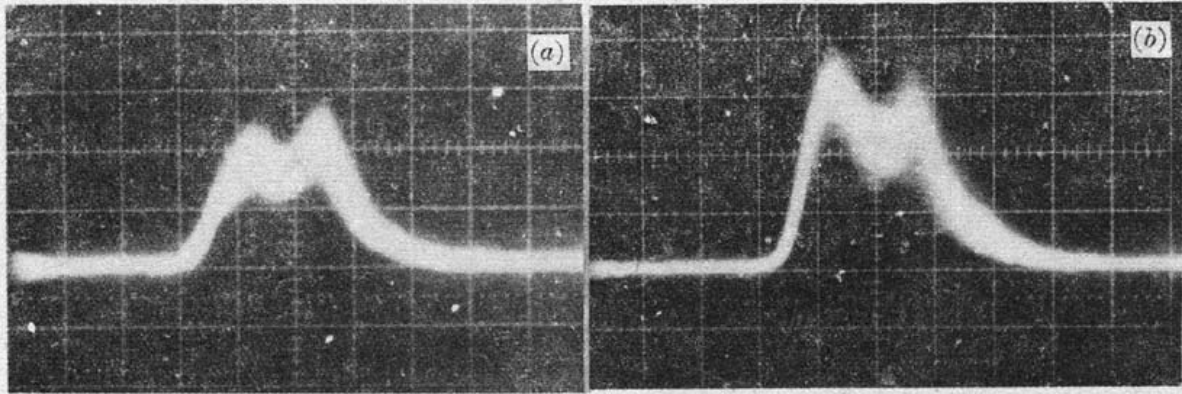


Fig. 5 Temporal profiles of the fundamental pulse (a) and the SHG pulse (b). Time scale: 10 ns/div

能提高功率密度,但如果透镜焦距过短,激光在晶体中的有效作用长度缩短,反而引起倍频效率下降。因此,减小基频光的发散角,提高基频光在衍射极限发散角内的功率是提高倍频效率的有效方法。

我们采用自滤波非稳腔振荡,注入锁定放大正是为了这一目的。当基频光(510.6 nm)的平均功率为 9.2 W 时,我们获得了 1.2 W 的紫外光,其转换效率为 13%,在相同的实验条件下,去除滤波小孔后,倍频效率下降到 8%。实验数据如表 1 所示。实验中将透镜焦距从 4.3 m 减小到 1.8 m,发现倍频效率随之提高,实验数据如表 2 所示。进一步缩短透镜焦距,晶体内则出现破坏点。在上述实验条件下,BBO 晶体内体破坏阈值约为 0.2 GW/cm^2 。据文献[3]报道:降低 CVL 的放电重复频率,可提高 BBO 晶体的破坏阈值,并克服晶体的热效应,提高 CVL 的倍频效率。

Table 1 Influency of filtering aperture on conversion efficiency

	Fundamental light power (W)	Fundamental light divergency (mrad)	SH power (W)	Conversion efficiency (%)
SFUR	9.2	0.22	1.2	13
NBUR	9.7	0.33	0.76	8

Table 2 Influency of lens focal length on conversion efficiency

Lens focal length (m)	Fundamental light power (W)	SH power (W)	Conversion efficiency (%)
1.8	9.2	1.20	13
2.0	8.4	0.85	10
4.3	9.4	0.74	8

图 5 (a), (b) 分别是基频光及倍频光脉冲波形的照片。两张照片的横坐标标尺是一致的,图 5 表明,倍频光脉冲前后两个小峰峰值之比大于基频光脉冲前后两个小峰峰值之比,这是因为: 1) CVL 每个输出光脉冲的发散角是时间的函数,因此每个脉冲峰对应的焦斑大小略有不同; 2) CVL 有气体热透镜效应,第二个脉冲小峰比第一个脉冲小峰在腔内多走一个来回,因此两个小峰通过焦距为 1.8 m 透镜聚焦后,焦点位置略有差异。所以倍频光的脉冲形状不仅取决于峰值功率,而且与基频光脉冲中每个小峰所对应的发散角及 BBO 晶体所处的位置有关。由于我们的激光器的气体热透镜等效为一个正透镜,因此当 BBO 移向聚焦透镜时,我们发现倍频光脉冲中的第二个小峰与第一个小峰的峰值之比随之提高,但总的倍频效率有所下降。

参 考 文 献

- 1 张桂燕 *et al.*, 光学学报, 4(6), 513(1984)
- 2 T. Omatsu *et al.*, *Opt. Commun.*, 79, 125(1990)
- 3 D. W. Coutts, J. A. Piper, *IEEE J. Quant. Electr.*, QE-28(8), 1761(1992)
- 4 M. Nikonchuk *et al.*, *Proc. of SPIE*, 1225, 419(1990)
- 5 梁培辉 *et al.*, 光学学报, 7(9), 783(1987)

980 nm 波段钛宝石可调谐激光泵浦 掺铒光纤放大器的净增益达 49.6 dB

采用的泵浦源是 Coherent 公司 899-29 型钛宝石可调谐激光器, 在 980 nm 波长处额定功率 600 mW, 激光线宽小于 6 GHz; 用于混合泵浦的 1480 nm 半导体激光器, 最大输出功率 90 mW。信号源为分布反馈半导体激光器, 单纵模工作波长 1536 nm, 额定功率 3.5 mW。所用的国产的掺铒光纤芯径 3.27 μm 、数值孔径 0.223、截止波长 958.6 nm; 英制掺铒光纤芯径 3.17 μm 、数值孔径 0.22、截止波长 910 nm、掺铒浓度 200 ppm; 980 nm 和 1480 nm 混合泵浦用的掺铒光纤芯径 4.9 μm 、数值孔径 0.22、截止孔径 0.22、截止波长 1.4 μm 、掺铒浓度 230 ppm; 英制铒/镱双掺杂的光纤、掺镱浓度 13000 ppm。信号光和泵浦光通过光纤波分复用器耦合进掺铒光纤, 波分复用器对信号光的耦合率大于 99%、对泵浦光直通率大于 90%, 以硅片上镀介质膜和小棱镜作滤波器和隔离器, 用 GDS50-15 双光栅单色仪, Coherent 212 型功率计和 AV2491 型光纤功率计作探测器。

在不同泵浦波长和不同温度条件下对掺铒光纤放大器特性进行了实验研究。在钛宝石可调谐激光 950~1000 nm 波段上, 掺铒光纤放大器的最佳泵浦波长向短波蓝移, 9.5 m 长的掺铒光纤放大器小信号净增益大于 45 dB(泵浦波长 979 nm), 当 38 mW 信号光通过掺铒光纤放大器时, 净输出为 3.48 mW, 净增益达到 49.6 dB; 最高增益, 当信号光为 31 μW 时, 掺铒光纤放大器最大功率输出为 5.1 mW。泵浦波长分别为 974 nm, 979 nm, 984 nm 时, 14.5 m 长的掺铒光纤放大器净增益分别为 39.6 dB, 41.1 dB 和 37.1 dB; 泵浦阈值分别为 5.8 mW, 3.5 mW 和 4.3 mW。

还进行了 980 nm 和 1480 nm 混合泵浦 21 m 长掺铒光纤放大器的研究, 增益为 31 dB。在 980 nm 泵浦铒/镱双掺杂光纤放大器时, 观察到绿色荧光, 21 cm 长的铒/镱光纤放大器的净增益达 10 dB。

(中国科学技术大学, 安徽 230026)

明 海 谢建平 刘 宇 戴特辉 钱景仁 董晓鹏 吴云霞 汤洪高;

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 230021

高军毅 丁 强 成国胜

收稿日期: 1993 年 8 月 5 日)