

# 谐振腔效应在自泵浦相位共轭中的作用

余卫龙 余振新

(中山大学超快激光光谱学国家重点实验室 广州 510275)

**提要** 在 Cu:KNSBN 晶体中,用 8 mW 的连续 532 nm 激光泵浦,产生很强的谐振腔振荡,但未观察到自泵浦相位共轭信号。用平均功率为 1 mW 的同波长锁模 ps 激光脉冲列泵浦,谐振腔振荡相对弱很多,但很容易形成自泵浦相位共轭,这显然不支持自泵浦相位共轭的谐振腔模型。

**关键词** 自泵浦相位共轭,谐振腔模型,光扇开

光学相位共轭技术因能自动补偿光波在不均匀媒质中传播产生的波前畸变而深受人们的重视。光折变自泵浦相位共轭镜只需一束入射光,相位匹配条件经自动调节可被满足,又有相当高的相位共轭反射率,故成为近年研究的热点。自泵浦相位共轭的产生机制是一个重要的研究课题。对连续光自泵浦相位共轭产生机制的研究已经提出 5 个不同的理论模型<sup>[1-5]</sup>。其中 Yeh 提出的谐振腔模型<sup>[3]</sup>经常被用来解释相位共轭光的脉动现象<sup>[6]</sup>。我们最近的实验结果却不支持这一理论模型。当我们分别以波长为 532 nm 的连续光和同波长锁模 ps 激光脉冲入射到掺 Cu 的 KNSBN 晶体中并研究各自的相位共轭反射率时,发现对相同的平均入射功率,连续光激起很强的谐振腔振荡,但未观察到自泵浦相位共轭信号。如果要使它形成自泵浦相位共轭,则需用 ps 激光脉冲进行诱导<sup>[7]</sup>。而锁模 ps 激光脉冲激起的谐振腔振荡相对弱很多,但它很容易形成自泵浦相位共轭。本文报道有关的实验结果并进行讨论。

图 1 是实验装置示意图。其中光源是美国光谱物理公司生产的 3000 型 CW 主动锁模 Nd:YAG 倍频脉冲激光器。其输出光波长为 532 nm。在锁模状态下,输出脉宽为 50~75 ps,脉冲重复率为 82 MHz 的超短激光脉冲列。输出平均功率为 340 mW。当锁模器关闭时,激光器输出连续光,功率为 10 mW。BS 是分束器, $F$  是可变光衰减器, $D_1$  和  $D_2$  是功率计, $D_1$  测量相位共轭光信号功率, $D_2$  监视泵浦光功率( $I/I_1$  已预先测定)。实验所用的晶体是从

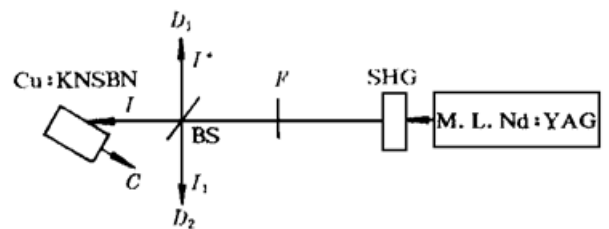


图 1 自泵浦相位共轭实验装置

Fig. 1 Schematic of the experimental set-up for self-pumped phase conjugation

山东大学晶体所购买的掺 Cu 的 KNSBN 晶体,尺寸为  $5 \times 5 \times 6$  (mm),  $c$  轴在 6 mm 方向,6 面抛光,已极化为单畴。入射光为  $e$  光,未聚焦,光斑直径约为 2 mm,近似为平行光束。

首先,将激光器置于锁模状态,激光器输出 ps 超短激光脉冲列。激光经分束器后到达晶体的功率为 270 mW。使入射光方向与晶体  $+c$  轴的夹角大于  $90^\circ$ ,保持入射光功率 270 mW 不变,改变入射角,测量相位共轭反射率  $R$ ,结果如图 2 所示。从图 2 看到,当入射角小于  $15^\circ$  时,

相位共轭反射率为零。当入射角在  $65^\circ$  附近时, 相位共轭反射率最大, 达 50%。实验中, 激光束入射位置距晶体 -  $c$  面约 4 mm。接着, 固定入射角在  $65^\circ$  处, 保持其它实验条件, 改变入射泵浦

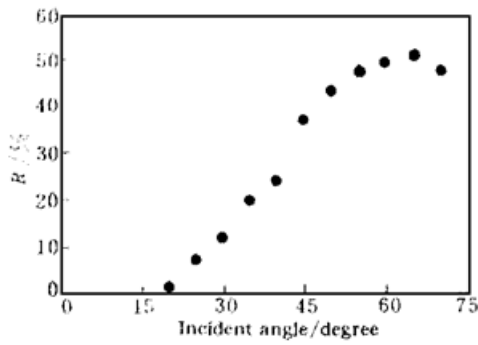


图 2 532 nm ps 激光脉冲自泵浦相位共轭反射率与入射角的关系。  $I = 270 \text{ mW}$

Fig. 2 The phase conjugative reflectivity of a 532 nm picosecond laser vs the incidence angle of the laser beam.  $I = 270 \text{ mW}$

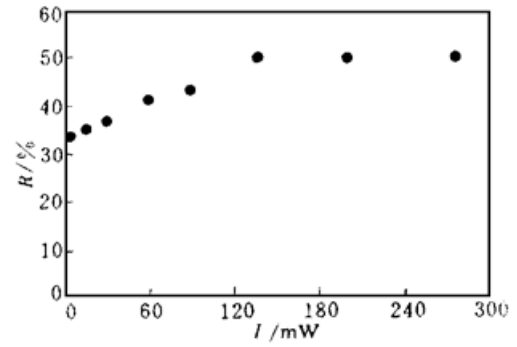


图 3 532 nm ps 激光脉冲自泵浦相位共轭反射率与入射光平均功率的关系。入射角为  $65^\circ$

Fig. 3 The phase conjugative reflectivity of 532 nm picosecond laser pulses vs the average power of the pumping beam. The incidence angle of the laser beam is  $65^\circ$

光平均功率。测量相位共轭反射率, 结果如图 3 所示。图 3 表示, 相位共轭反射率依赖于入射光平均功率。对小的入射光平均功率, 反射率随入射光平均功率的增大而增大, 然后渐渐趋于饱和状态。在泵浦光平均功率为 1 mW 处相位共轭反射率约为 33%。最后, 对入射光平均功率分别为 1 mW, 4 mW 和 8 mW 时, 我们分别测量从激光开始入射到相位共轭光开始出现所需的时间和相位共轭光信号开始出现到信号达到最大值的  $(1 - e^{-1})$  所用的时间, 前者分别为 20 s, 6 s 和 2 s, 后者分别为 390 s, 106 s 和 50 s。可见响应时间基本上是反比于激光的平均功率, 自泵浦相位共轭未见有依赖于激光脉冲瞬时功率的快速响应, 而是属于依赖于激光能量积分的慢速光折变效应。此后, 我们关闭锁模器, 让连续光入射到晶体。注意到锁模 ps 脉冲自泵浦相位共轭反射率的最大值在  $65^\circ$  的入射角附近, 我们将入射角调在  $65^\circ$  处, 然后调  $F$ , 改变入射光的功率。当入射光功率从 1 mW 改变到 8 mW 时, 均未观察到相位共轭光信号, 不过, 在 8

mW 处, 观察到晶体中存在一条以晶体的一对内角为腔镜的振荡光环路, 如图 4 (a) 所示。图 4 (a) 表明, 晶体内的光振荡是多模振荡。这里必须作一说明, 由于连续光的光扇开很强并且朝晶体的 -  $c$  轴方向散开, 这些散开光叠加在振荡光回路上, 就使得照片上入射点左边的振荡光回路变得较明亮, 所以使振荡光回路看起来似乎不太连续。作为比较, 在平均入射功率为 8 mW 和  $65^\circ$  的入射角条件下, 我们拍摄了锁模 ps 激光脉冲在自泵浦相位共轭形成时晶体中光强分布的像, 结果如图 4 (b) 所示。与图 4 (a) 完全不同, 图 4 (b) 中有一条清晰的、连接于晶体一个内角和入射点的光路而未见类似于图 4 (a) 的振荡光环路。对图 4 的实验结果, 谐振腔振荡是封闭式的, 没有直接输出, 故仍难比较超短激光脉冲泵浦与连续光泵浦情况下

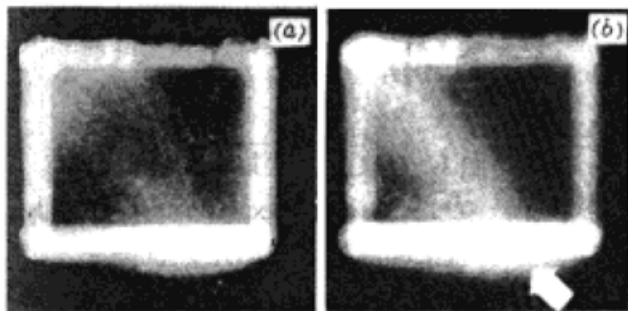


图 4 532 nm 连续光和 ps 激光脉冲泵浦情况下晶体中的光强分布

a) 连续光泵浦, 产生谐振腔振荡; (b) ps 激光脉冲泵浦, 自泵浦相位共轭形式。入射角  $65^\circ$ , 入射光平均功率 8 mW

Fig. 4 The photographs of the crystal

(a) pumped by using a 532 nm CW laser beam, internal oscillation is formed; (b) pumped by using picosecond laser pulses, self-pumped phase conjugation is used

谐振腔振荡的强弱。为了进一步研究谐振腔振荡在自泵浦相位共轭建立过程的作用,我们调整一下晶体主光轴的取向,使入射光方向与晶体 +  $c$  轴的夹角小于  $90^\circ$ ,如图 5(a) 所示。这时,扇开光朝 -  $c$  轴方向散开。通过二波耦合获得增益,晶体中以一对  $a$  晶面作为腔镜产生激光振荡。图 5(b) 和(c) 分别给出连续光泵浦和锁模 ps 激光脉冲泵浦情况下振荡输出光束光斑的照片。拍摄时,两种光的平均入射功率均为  $8 \text{ mW}$ 。曝光时间也都为  $10^{-2} \text{ s}$ ,并加上相同的中性滤光片。拍摄时,激光束的入射角均取  $37^\circ$ 。可见,连续光诱导的谐振腔振荡比锁模 ps 激光脉冲诱导的强很多倍。实验中注意到,对图 5(a) 的结构,在连续光泵浦下,尽管谐振腔效应很强,但未能观察到明显相位共轭光。这说明,谐振腔效应对自泵浦相位共轭无甚贡献,实际上只起着一种损耗的作用。

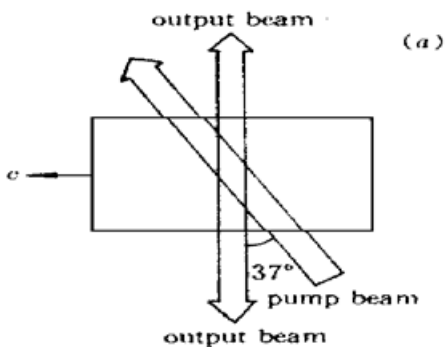


图 5 Cu·KNSBN 晶体中的谐振腔振荡

a) 实验几何结构; (b) 532 nm 连续光泵浦时振荡输出光束光斑; (c) 532 ps 激光脉冲泵浦时振荡输出光束光斑,  $I = 8 \text{ mW}$

Fig. 5 Resonant cavity oscillation in Cu·KNSBN crystal

(a) Schematic of the experiment set-up; (b) The out-put spot when pumped by a CW laser beam at 532 nm;

(c) The out-put spot when pumped by picosecond laser pulses at 532 nm,  $I = 8 \text{ mW}$

实验和理论分析已表明<sup>[8]</sup>,对 KNSBN 晶体,入射的激光束能通过光折变效应在晶体中诱导产生一条非对称的光折变波导。这样的光折变波导不仅在光束自弯曲的过程中起着关键的作用,而且在自泵浦相位共轭建立过程中也起着关键性的作用<sup>[7,9]</sup>。在自泵浦相位共轭建立的初始阶段,谐振腔效应和光折变波导的建立互相竞争,而它们都依赖于光扇开。在 Cu·KNSBN 晶体中,实验已经证明,连续光的光扇开要比锁模 ps 激光脉冲的强<sup>[7]</sup>。图 5 又表明,连续光诱导的谐振腔振荡要比锁模 ps 激光脉冲诱导的强。而这些都是由于连续光有比锁模 ps 激光脉冲长得多的相干时间。所以,对连续光泵浦的情况,谐振腔振荡在竞争中取得优势,占主导地位,光折变波导的建立则被抑制;对锁模 ps 激光脉冲泵浦的情况,谐振腔振荡相对弱了很多,光折变波导的建立取得了主导地位,较多的扇开光被引导到光折变波导中去,谐振腔振荡最终受到抑制。

光折变波导的建立导致自泵浦相位共轭的建立,我们已在参考文献[7,9]中进行过讨论,这里不再赘述。要说明的是,多模的谐振腔振荡为什么对自泵浦相位共轭无甚贡献,只起着一种损耗作用。我们知道,谐振腔振荡主要是通过光扇开获得增益,而光扇开本身则是一个多级的二波耦合过程,即是说,第一级的扇开光通过二波耦合产生第二级的光扇开,第二级又产生第三级,如此下去,产生总体的光扇开。多模谐振腔振荡中的某一条细的光线(近似地具有某一波矢  $K_i, i = 1, 2, \dots$ ) 可以与某一级的扇开光产生耦合,建立起四波混频过程,从而产生一个相位共轭光束。但是,大多数这种相位共轭光束不是直接地沿着原来泵浦光束的透射光的相反方向返回,而是沿着某一级的扇开光的相反方向返回,于是它还要经过若干级的四波混频过程

才对总的入射光的相位共轭光有贡献。由于扇开光每一条细光线都很弱,它与谐振腔振荡中的某一条细光线建立的四波混频相位共轭过程的相位共轭反射率要远小于1。这样,经过多级四波混频过程,最后对总的相位共轭反射率的贡献趋近于零。这里应注意到,级次越低的扇开光,它与谐振腔振荡的光路的夹角越大,相互作用区也越小,两者形成的四波混频相位共轭过程,反射率也越小。于是,从总的效应看来,多模谐振腔振荡对总的相位共轭反射率无甚贡献,只起着一种损耗的作用,这与我们观察到的结果是一致的。总之,我们的实验结果不支持自泵浦相位共轭的谐振腔模型<sup>[3]</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 J. Feinberg. Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(16) : 486~ 488
- 2 G. Zhang, J. Xu, Y. Wu *et al.*. Photorefractive self-bending and high-performance KNSBN·Cu crystal self-pumped phase-conjugation. *Chinese Phys. Lett.*, 1992, **9**(1) : 23
- 3 P. Yeh. Two-wave mixing in nonlinear media. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1989, **QE-25**(3) : 486~ 519 (see p510~ 511)
- 4 T. Y. Chang, R. W. Hellwarth. Optical phase conjugation by backscattering in barium titanate. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(8) : 408~ 410
- 5 Y. Lian, H. Gao, P. Ye. Self-pumped phase conjugation with a new mechanism in  $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ : Fe crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**(13) : 1745~ 1747
- 6 D. Wang, Z. Zhang, X. Wu *et al.*. Instabilities in a mutually pumped phase conjugator of  $\text{BaTiO}_3$ . *J. Opt. Soc. Am. B*, 1990, **7**(12) : 2289~ 2293
- 7 She Weilong, Yu Zhenxin, Lee Wingkee. 532 nm CW laser beam self-pumped phase conjugation induced by a photorefractive waveguide in Cu doped KNSBN crystal. *Chinese Journal of Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(10) : 920~ 924 (in Chinese)
- 8 W. L. She, Z. X. Yu, W. K. Li. Laser beam deflection in a photorefractive crystal induced by lateral beam movement. *Opt. Commun.*, 1997, **135** : 342
- 9 She Weilong, Yu Zhenxin, Lee Wingkee. Self-pumped phase conjugation of imperfectly mode-locked picosecond laser pulses induced by a photorefractive waveguide. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1996, **45**(12) : 2010~ 2015 (in Chinese)

## Role of Resonant-cavity-oscillation Effect in Self-pumped Phase Conjugation

She Weilong Yu Zhenxin

(State Key Laboratory of Ultrafast Laser Spectroscopy, Zhongshan University, Guangzhou 510275)

**Abstract** It is found experimentally that with no self-pumped phase conjugation an intensive internal oscillation is observed inside a Cu doped KNSBN crystal pumped with an 8 mW laser beam of continuous-wave at 532 nm. But when the crystal is pumped with mode-locked picosecond laser pulses with an average power of 1 mW at 532 nm, self-pumped phase conjugation with hardly observed internal oscillation is easily formed. It suggests that our experimental results do not support the resonator mode of self-pumped phase conjugation.

**Key words** self-pumped conjugation, resonator mode, fanning