

Cu : KNSBN 晶体中光折变波导诱导 532 nm 连续光自泵浦相位共轭

余卫龙 余振新

李荣基

(中山大学超快速激光光谱学国家重点实验室, 广州 510275)

(香港中文大学物理系)

提要 在原来用 8 mW 连续 532 nm 激光不能产生自泵浦相位共轭的入射角下, 先用锁模 532 nm 的 ps 激光脉冲在 Cu : KNSBN 晶体中预制一条光折变波导, 就很容易用连续 532 nm 激光形成自泵浦相位共轭。预制的光折变波导在一般照明条件下可保存 30 min 以上。

关键词 光折变波导, 诱导自泵浦相位共轭

1 引言

自从自泵浦相位共轭现象在 BaTiO_3 ^[1] 中被发现以后, 光折变晶体自泵浦相位共轭镜的性质和应用引起了人们极大的研究兴趣。至今已有四种类型的自泵浦相位共轭镜被观察到, 它们分别是: 猫型^[1]、受激背向散射型^[2]、背向散射四波混频型^[3]和自弯曲连续四波混频型^[4]。各种类型的自泵浦相位共轭镜都有一个共同的特征, 就是在自泵浦相位共轭形成时, 总是在晶体中出现一条连接于入射点的明亮的光路, 尽管这条光路后来会分裂成两条或多条光路。入射光的相当一部分能量被引导到这一条明亮的光路中去。最近我们用失锁模 532 nm 的 ps 激光脉冲入射到 Cu : KNSBN 晶体时发现, 单独用这种激光入射, 无论如何也不能产生自泵浦相位共轭, 但当我们用锁模 ps 激光脉冲入射, 则很容易观察到自泵浦相位共轭信号, 同时观察到晶体中形成一条连接于入射点和一个晶体内角的明亮光路。随后我们用失锁模 ps 激光脉冲入射, 当入射角大于等于 63° , 失锁模激光脉冲又能形成自泵浦相位共轭, 且在晶体中出现一条类似于锁模 ps 激光脉冲入射情况下的明亮光路。我们在文献[5]中报道了一些实验结果, 并且指出, 当 ps 激光脉冲形成自泵浦相位共轭的时候, 它在明亮光路经过的地方形成一条光折变波导, 这条光折变波导对后继入射光的扇开光具有集束和引导作用, 因而使原来不能形成自泵浦相位共轭的失锁模 ps 激光脉冲也能形成自泵浦相位共轭。最近我们又观察到, 用 8 mW 连续 532 nm 激光束入射到 Cu : KNSBN 晶体中, 扇散射很强, 谐振腔效应也很强, 但在入射角小于 67° 的条件下, 不能形成自泵浦相位共轭, 如果先在 60° 的入射角下, 用锁模激光脉冲在晶体中预制一条光折变波导, 再用连续光入射, 即使入射角从 75° 变到 45° , 则可形成自泵浦相位共轭, 这与光折变波导诱导失锁模 ps 激光脉冲自泵浦相位共轭有所不同。本文报道有关的实验结果并进行讨论。

2 实验结果及其讨论

实验所用的激光器是美国光谱物理公司生产的 3000 型 CW 主动锁模 Nd:YAG 倍频激光器,输出光波长为 532 nm。在锁模状态下,脉宽为 50~75 ps,脉冲重复率为 82 MHz,平均输出功率为 340 mW。当锁模器关闭时,激光器输出连续光,连续光经过 $\lambda/2$ 片和格兰棱镜后作水平偏振,功率为 8 mW。激光束未聚焦,近似为平行光束,其直径约为 2 mm。实验采用 Cu:KNSBN 晶体,尺寸为 5 mm×5 mm×6 mm。晶体光轴水平放置,使得入射光为 e 光。

实验中,先关掉锁模器,激光器输出连续激光,将此激光入射到 Cu:KNSBN 晶体中,入射光方向与晶体 $+c$ 轴的夹角大于 90° ,这时观察到扇开光朝晶体 $-c$ 轴方向散开。当入射角从 0° 连续变到 66° 时,均未观察到自泵浦相位共轭信号。我们观察到,连续光经过晶体时产生强烈的扇散射,其散射强度比相同平均功率的锁模 ps 激光脉冲大。图 1 给出入射角 $\alpha = 6^\circ$ 时相同平均功率(8 mW)锁模激光和连续光的透射光因扇散射而随时间衰减的情况。其中(a)为锁模激光,(b)为连续激光。可见连续激光的扇散射比锁模激光的强得多。我们还观察到,在一定的入射角下,对连续光入射,除了产生强烈的扇散射外,晶体中还出现以一对内角为腔镜的谐振腔振荡,谐振腔振荡主要表现为一种损耗,对相位共轭波无甚贡献,而对锁模激光来说,谐振腔效应相对弱了很多^[6]。图 2 中连续光的透射光随时间而衰减,就是扇散射效应和谐振腔效应的共同作用引起的。图 2 对应的入射角 $\alpha = 65^\circ$ 。对较大的入射角,未给出锁模激光和连续激光透射光的比较,是因为当 $\alpha > 15^\circ$ 时,锁模激光已经产生自泵浦相位共轭^[6]。为与锁模激光脉冲自泵浦相位共轭产生的现象相比较,对连续光,在 $\alpha = 60^\circ$ 的实验条件下,我们用照相机在晶体上方拍摄晶体中光强分布的像,如图 3(a) 所示。我们注意到,晶体中未出现一条明亮的光路。如前所述,这时不产生自泵浦相位共轭。

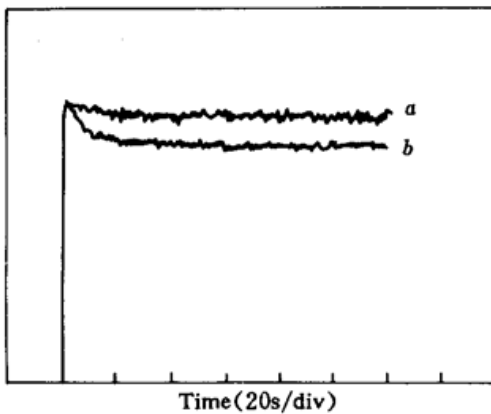


Fig. 1 Transmissivity decay with time due to fanning in Cu doped KNSBN crystal
(a) CW mode-locked picosecond laser pulse;
(b) CW laser beam. The incidence angle is 6°

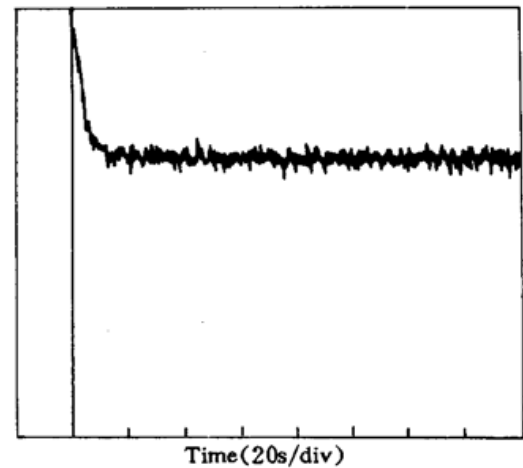


Fig. 2 Transmissivity of CW laser beam decays with time due to fanning and resonator effect in Cu doped KNSBN crystal. The incidence angle is 65°

接着,将激光器锁模,并用光衰减器将激光平均功率衰减到 8 mW。将衰减后的激光束以 60° 的入射角入射到晶体,相位共轭光很快就出现,晶体中伴随出现一条连接于晶体一个内角和入射点的明亮光路,如图 3(b) 所示。然后挡住激光,关掉锁模器,去掉光衰减器,再让 8 mW 的连续激光在相同的入射角和入射点下入射到晶体,相位共轭光也很快就出现,这时,在晶体

中出现一条类似于图 3(b) 的明亮光路,如图 3(c) 所示。比较图 3(a) 和 (c), 易见两者是明显不同的。再接着的实验步骤如下:保持入射点不变,每次等连续光的相位共轭光稳定后就挡住激光束,转动晶体,改变入射角,再让连续光入射。入射角改变的次序为 $65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 55^\circ, 50^\circ, 45^\circ$ 和 40° 。对这些入射角,除了 40° 外,都能观察到自泵浦相位共轭信号,相应地,都能观察到一条类似于图 3(b) 的、连接于晶体一个内角和入射点的明亮光路。因 $\alpha = 40^\circ$ 不能形成自泵浦相位共轭,故图 3 中未给出相应的晶体照片,其它入射角下晶体的照片全部给出,如图 3(d) 至 (i) 所示。图中的照片不按入射角的大小而是按实验的先后排序。从图 3 的实验结果看来,连续光自泵浦相位共轭,是由锁模 ps 激光脉冲诱导形成的。实验发现,在锁模 ps 激光脉冲入射并形成自泵浦相位共轭后,挡掉激光束,在一般照明条件下经 30 min 后再用连续光入射,上述诱导自泵浦相位共轭过程仍然发生,但如果所隔的时间更长,例如 3 h,诱导就失败了。

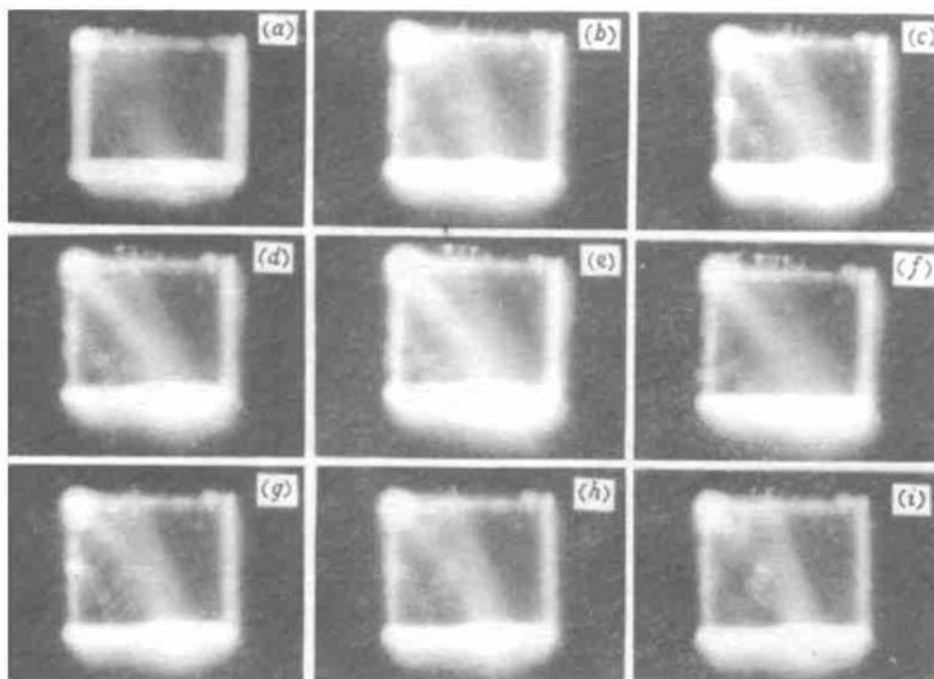


Fig. 3 CW laser beam self-pumped phase conjugation induced by a photorefractive waveguide in Cu:KNSBN crystal

(a) before inducing. The incidence angle $\alpha = 60^\circ$; (c) ~ (i) CW laser beam self-pumped phase conjugation induced by a photorefractive waveguide at several incidence angles; (c) $\alpha = 60^\circ$, (d) $\alpha = 65^\circ$; (e) $\alpha = 70^\circ$; (f) $\alpha = 75^\circ$; (g) $\alpha = 55^\circ$; (h) $\alpha = 50^\circ$ and (i) $\alpha = 45^\circ$

现在讨论上述实验结果。众所周知,扇散射在自泵浦相位共轭中起着重要作用,但太强的扇散射反而会影响自泵浦相位共轭的形成。在 Cu:KNSBN 晶体中,连续光 532 nm 激光扇散射很强,再加上很强的谐振腔效应,就形成很大的联合损耗(因为晶体中的谐振腔振荡对自泵浦相位共轭无甚贡献^[6])。对低功率的入射连续光,过大的损耗使得它不能形成自泵浦相位共轭。与此相比,锁模 ps 激光脉冲的扇散射和谐振腔效应^[6]就相对弱得多,因而损耗就小很多,于是就容易形成自泵浦相位共轭。扇散射和谐振腔振荡是通过二波耦合获得增益的,而二波耦合有赖于激光的时间相干性。我们知道连续激光的相干长度远长于锁模 ps 激光脉冲的相干长度,所以连续光的扇散射和谐振腔振荡比锁模 ps 激光脉冲的强得多就容易理解。再说诱导自泵浦相位共轭,当锁模 ps 激光脉冲在晶体中形成自泵浦相位共轭时,如文献[5]所指出的,在

连接于晶体一个内角和入射点的光学通道(明亮光路)上,通过光折变效应,诱导产生了一条光折变波导。这条光折变波导对后继入射连续光的扇散射光具有集束和引导作用,它使相当大的一部分连续光能流进入该波导并在晶体一角上产生全反射。反射光和前进光通过耦合,一方面巩固了原有光折变波导,另一方面又构成四波混频过程的一对泵浦光,最终导致连续激光自泵浦相位共轭过程的建立。最后我们比较光折变诱导连续激光自泵浦相位共轭和光折变波导诱导失锁模 ps 激光脉冲自泵浦相位共轭。文献[5]的实验结果告诉我们,光折变波导只能在 $\alpha \geq 63^\circ$ 的入射角下诱导失锁模 ps 激光脉冲形成自泵浦相位共轭,而从图 3 看到,对 $75^\circ \geq \alpha \geq 45^\circ$,光折变波导均能诱导连续激光形成自泵浦相位共轭。我们相信,这种差异主要是由两种光的时间稳定性和时间相干性的差异引起的。实验表明,失锁模 ps 激光脉冲平均功率起伏比较大^[5],这说明其脉冲幅度起伏比较大,另外,由于失锁模,各个脉冲中的光振动时间分布也会有稍大的变化,从傅里叶变换考虑,各个脉冲频谱也会产生相应的变化,这就使失锁模 ps 激光脉冲的时间相干性变劣,而连续光在振幅和频谱两方面就显得较为稳定。于是,在相同的入射角下,失锁模 ps 激光脉冲建立的折射率光栅就没有连续光建立的稳定,其内反射光和前进光的二波耦合强度也就比连续光的弱。已知光折变晶体中弯曲光通道的形成有赖于前进光波和后行光波的二波耦合^[7],而且知道对小的入射角 α ,在弯曲光通道靠近入射点的地方,光学通道与晶体 C 轴的夹角变大,KNSBN 晶体的有效电光系数^[8]相应变小(注意光学通道与晶体 C 轴的夹角约在 90° 到 45° 之间变化),二波耦合强度也随之变弱。因此,对失锁模 ps 激光脉冲来说,要获得足够大的二波耦合强度,以巩固原有的光折变波导,它所要求的入射角必定要比连续光的大。这与我们观察到的实验结果是一致的。对光折变波导诱导失锁模 ps 激光脉冲自泵浦相位共轭,在文献[5]中,我们报道的失锁模 ps 激光脉冲平均功率为 40 mW。最近,我们进一步的实验研究表明,对 $\alpha \geq 63^\circ$,用平均功率为 8 mW 失锁模 ps 激光脉冲,也能被光折变波导诱导形成自泵浦相位共轭,而且,当入射平均功率在 8~40 mW 范围内变化,其自泵浦相位共轭反射率变化不大。由实验结果和以上讨论,我们可以得到如下结论:在 Cu:KNSBN 晶体中,对失锁模 ps 激光脉冲和连续光,当入射角从 0° 变到 66° ,在预制光折变波导以前,均不能形成自泵浦相位共轭,而在预制光折变波导以后,连续光比失锁模 ps 激光脉冲更容易形成自泵浦相位共轭,这种差异主要来源于两种激光时间稳定性和时间相干性的差异。

参 考 文 献

- 1 J. Feinberg. Self-pumped, continuous-wave phase conjugator using internal reflection. *Opt. Lett.*, 1982, 7: 486
- 2 T. Y. Chang, R. W. Hellwarth. Optical phase conjugation by backscattering in barium titanate. *Opt. Lett.*, 1985, 10: 408
- 3 Y. Lian, H. Gao, P. Ye *et al.*. Self-pumped phase conjugation with a new mechanism in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$: Fe crystal. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 63: 1745
- 4 G. Zhang, J. Xu, Y. Wu *et al.*. Photorefractive self-bending and high-performance KNSBN: Cu crystal self-pumped phase-conjugator. *Chinese Phys. Lett.*, 1992, 9: 23
- 5 余卫龙,余振新,李荣基. 光折变波导诱导失锁模 ps 激光脉冲自泵浦相位共轭. 物理学报, 待发表
- 6 余卫龙,余振新. 532 nm 处 Cu:KNSBN 晶体锁模 ps 激光脉冲和连续光自泵浦相位共轭研究. 待发表
- 7 A. A. Zozulya, M. Saffman, D. Z. Anderson. Propagation of light beams in photorefractive media: fanning, self-bending, and formation of self-pumped four-wave-mixing phase conjugation geometries. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, 73: 818
- 8 余卫龙,李庆行,余振新等. Mn:KNSBN 晶体在 632.8 nm 处高读出效率全息存储及电光张量元相对值估算. 中国激光, 1992, 19(12): 915

532 nm CW Laser Beam Self-pumped Phase Conjugation Induced by a Photorefractive Waveguide in Ce doped KNSBN Crystal

She Weilong Yu Zhenxin

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

Lee Wingkee

(Department of Physics, the Chinese University of Hong Kong, Shatin NT Hong Kong)

Abstract We report CW laser beam self-pumped phase conjugation (SPPC) induced by a photorefractive waveguide created by SPPC of CW mode-locked laser radiation in photorefractive crystal Cu : KNSBN. After a waveguide is created in the crystal by using the second harmonic of a CW mode-locked Nd : YAG laser at 532 nm, self-pumped phase conjugation can be achieved by using the same wavelength CW laser beam at some incidence angles where SPPC cannot be achieved by using the CW laser beam alone. The lifetime of the photorefractive waveguide is longer than 30 minutes under dark conditions.

Key words photorefractive waveguide, induced self-pumped phase conjugation