

光折变相位共轭技术的研究进展

侯春风 孙秀冬 周忠祥 李焱 姜永远 刘炳胜
(哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨, 150001)

摘要: 简要地介绍了光折变相位共轭技术的研究概况, 着重介绍了自泵浦相位共轭镜及互泵浦相位共轭镜的研究进展, 对它们的结构及机理做出了说明。

关键词: 光折变晶体 相位共轭 自泵浦相位共轭镜 互泵浦相位共轭镜

Development of photo-refractive phase conjugation techniques

Hou Chunfeng, Sun Xiudong, Zhou Zhongxiang, Li Yan, Jiang Yongyuan, Liu Bingsheng
(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

Abstract: This paper gives a brief introduction of the situation of researches on photorefractive phase conjugation techniques, pays particular attention to introduce the progress of the researches on self-pumped phase conjugator and mutually pumped phase conjugator, and explains their structures and mechanisms.

Key words: photorefractive crystals phase conjugation self-pumped phase conjugator mutually pumped phase conjugator

引言

相位共轭波是指在振幅、相位及偏振态三个方面互为时间反演的波, 在数学上相当于对光波复振幅做复共轭操作。由于相位共轭波能理想地消除波前的畸变, 因而被广泛地应用于自适应光学、光计算、光通讯、图像处理、实时信息处理等许多方面。

能够产生相位共轭波的装置称为相位共轭镜。目前产生相位共轭波的方法可归结为两大类: 一类是参量过程, 或称为弹性散射过程, 例如三波混频、四波混频、光子回波等; 另一类是非参量过程, 例如受激布里渊散射、受激喇曼散射等。通过对大量介质中各种不同物理机制的探

- 5 李尚义. 激光杂志, 1989; 10(5): 201~ 204
- 6 李尚义. 中国激光, 1990; 17(9): 566~ 568
- 7 Li Sh Y, Xiao J N, Chen D G. Chines Physics Lasers, 1986; 13(7): 452~ 456
- 8 李尚义. 光子学报, 1994; 23(Z1): 141~ 145
- 9 李尚义. 一种单频 HeNe 激光器的自稳频原理分析. 第五届全国基本常数、激光参数、激光器件学术会议论文集. 黄山: 河海大学, 1992: 70
- 10 李尚义. 激光技术, 1994; 18(4): 230~ 235
- 11 李尚义. 激光技术, 1995; 19(1): 1~ 5
- 12 周炳昆, 高以智, 陈家骅. 激光原理. 北京: 国防工业出版社, 1980: 93~ 95
- 13 Abramowitz M. Handbook of Mathematical Functions. Washington D C: National Bureau of standards, 1994: 325

作者简介: 李尚义, 男, 1941 年出生。高级工程师。长期从事激光器件及其应用的研制工作。

索,光折变材料由于具有非线性系数大、灵敏度高、耦合效率高以及低功率响应等优点,而成为实现四波混频相位共轲的最佳选择。

大多数介质的光学非线性都随入射光束光强的增加而增加,只有当光强足够高时才能显示出合适的非线性,要在很强的光强下(兆瓦量级)才能进行相位共轲实验。与之相反,光折变晶体的光强阈值非常低,甚至根本不存在,非线性可在很低的光强下就达到较大的稳定的饱和值,因而在毫瓦量级或者微瓦量级的入射光束的作用下就可产生相位共轲光。光折变材料不仅可以用来构成低阈值的相位共轲镜,实现消畸变操作,它与非线性共轲光学的结合使其在光放大、实时图像处理以及在光计算和光通讯等方面也显示了广阔的应用前景^[1~3],人们也因此更加重视光折变相位共轲光学的研究,特别是在波混频过程中,光折变材料显示出不可思议的极强的非线性效应,这导致了各种无源相位共轲镜、环形振荡器及光束放大器的飞速发展,基于四波混频原理的各种各样的光折变相位共轲镜和振荡器也相继被发现。

一、自泵浦相位共轲镜的研究进展

光折变相位共轲镜主要分为自泵浦相位共轲镜和互泵浦相位共轲镜两大类。仅需要一束入射光,其它参与相互作用的光束均是自发产生的,也就是说器件本身是自激式的,人们将这种相位共轲镜称为自泵浦相位共轲镜。1982年,White等^[4]首先实现了一种自泵浦相位共轲镜——线性自泵浦相位共轲镜,其结构如图1a所示。他们将一块光折变晶体置于一线性共振腔内,入射光首先导致腔内的光振荡,所产生的相向传播的振荡光作为泵浦光与入射光发生四波混频作用而产生相位共轲光。一旦相位共轲光产生,即使撤去构成共振腔的一个反射镜,如图1b所示,四波混频仍然可以维持,仍有相位共轲光输出,这便是半线性自泵浦相位共轲镜^[5]。

同年,Feinberg^[6]利用一块BaTiO₃晶体成功地实现了完全自包含的全内反射式的“猫式”自泵浦相位共轲镜(如图1c所示),得到了30%的相位共轲反射率。这种相位共轲镜中泵浦光在晶体的一个棱角附近分别发生两次全内反射,从而参与两个四波混频作用区的耦合。“猫式”自泵浦相位共轲镜结构紧凑,不易受外界条件的干扰和影响,具有相当好的图像保真度和较高的相位共轲反射率,被公认为是光折变领域里比较适用的器件之一。

1983年,Cronin-Colomb等^[7]提出了另一种自泵浦相位共轲镜,其光路如图1d所示。入射光束通过光折变晶体经两个全反镜反射后入射到光折变晶体上,通过简并四波混频过程产生相位共轲光。从光路结构上看,这种器件具有一环形回路,故称为环形自泵浦相位共轲镜。

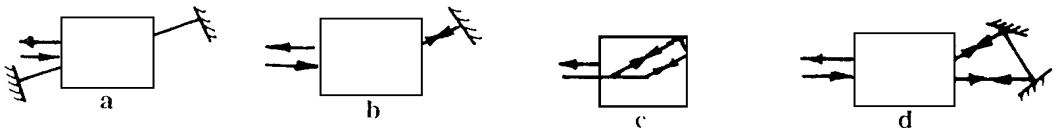


Fig. 1 Schematic diagrams of self-pumped phase conjugators

a—linear self-pumped phase conjugator b—semi-linear self-pumped phase conjugator c—“Cat” self-pumped phase conjugator d—ring self-pumped phase conjugator

1985年,Chang等^[8]提出了由晶体中的受激后向散射过程产生相位共轲的自泵浦相位共轲镜。在这种自泵浦相位共轲镜中,入射光在传播的过程中由于晶体杂质或缺陷等原因产生后向散射光,后向散射光与入射光产生 $2k$ 光栅,入射光经该光栅衍射,而不是经两次全内反射

产生相位共轭光。

1993 年,叶佩弦等^[9]提出了“后向散射加四波混频”光折变自泵浦相位共轭镜,他们利用这种自泵浦相位共轭组态在 BaTiO₃ 晶体中获得了高达 80% 的相位共轭反射率。在这一过程中,入射光的扇出光和扇出光激发的后向散射光构成一对反向传播的光束,它们和入射光在晶体的一个区域内通过四波混频产生相位共轭光。此过程无需内反射。从 1993 年至 1995 年叶佩弦等人对“猫式”、后向散射式以及后向散射加四波混频式自泵浦相位共轭机制进行了深入的研究^[9~14],探讨了它们之间的关系和相互转化的条件,并于 1996 年提出了一个统一的模型^[15]解释了这三种自泵浦相位共轭过程,深刻地揭示了它们的本质。他们通过实验发现,当入射光波长或晶体的掺杂浓度较高时,后向散射加四波混频自泵浦相位共轭过程更易于产生;而当入射波长较长或晶体的掺杂浓度较低时,只能借助于全内反射产生“猫式”自泵浦相位共轭。叶佩弦等认为四波混频是产生相位共轭的必要条件,后向散射也必须通过四波混频来产生相位共轭光。因此,对于自泵浦相位共轭而言,必须存在一个产生反向传播光束的根源或机制,不同的机制对应于不同的过程,后向散射加四波混频或全内反射过程。也就是说,不同过程之间的差别仅在于反向传播光束的产生方式不同,但本质是相同的,都是四波混频过程。

自泵浦相位共轭镜只需一束入射光即可实现波混频,克服了普通四波混频装置中需要多束光束,且读出光束需要满足布喇格条件的缺点,大大地简化了相位共轭光学系统。然而,由于自泵浦相位共轭镜只用一束入射光来实现波混频,因此,不能得到增益的信号,因而在应用上受到一定的限制。互泵浦相位共轭镜比自泵浦相位共轭镜阈值更低,且可实现光束的放大,因此更受到人们的重视。

二、互泵浦相位共轭镜的研究进展

互泵浦相位共轭镜是一种能够同时产生两束入射光的相位共轭光的装置。互泵浦相位共轭过程需要两束入射光,由于两束光的配置及实验条件的不同,从而形成了多种形式的互泵浦相位共轭镜,如双相位共轭镜、互不相干光束耦合器、鸟翼式互泵浦相位共轭镜、蛙腿式互泵浦相位共轭镜和桥式互泵浦相位共轭镜等,它们的光路如图 2 所示。

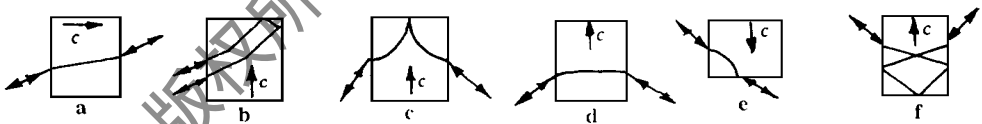


Fig. 2 Schematic diagrams of mutually pumped phase conjugators

a—double phase conjugator b—mutually incoherent beam coupler c—bird wing mutually pumped phase conjugator d—e—bridge mutually pumped phase conjugator f—frog legs mutually pumped phase conjugator

双相位共轭镜如图 2a 所示,是人们实现的第一种互泵浦相位共轭镜。1984 年,Cronin-Golomb 等首先从理论上研究了双相位共轭镜,利用在四波混频过程中的自振荡对其进行了解释。1987 年,Weiss 等^[16]第一次用 BaTiO₃ 晶体实现了双相位共轭镜。两束来自不同氩离子激光器的激光分别从 BaTiO₃ 晶体的两个相对表面入射,无需任何外部或内部的反射,借助于在两束光相交区域建立的透射相位光栅(或称单区四波混频过程),同时得到了两束入射光的稳定的相位共轭输出。Weiss 等利用此组态得到了大约 50% 的相位共轭透过率和将近 400% 的高相位共轭反射率。

双相位共轭镜实现以后不久,Smout 和 Eason^[17]利用两束入射光从晶体的同一表面入射

如图 2b 所示,借助于光在晶体表面上的反射,在两束光之间建立起耦合通道,从而实现了互不相干光束的耦合,产生了相位共轭光。他们成功地完成了来自不同激光器具有完全不同模式的两束光之间的耦合,因此,这种互泵浦相位共轭镜被称为互不相干光束耦合器。

1988年, Ewbank^[18]让两束光从 BaTiO₃ 晶体的两个相对的面对称入射,由于光扇效应,两束光向晶体的+ C面弯曲并发生反射,形成耦合通道,实现两束光的耦合,产生相位共轭光。由于这种互泵浦相位共轭镜的光束耦合通道形似鸟翼,因此,被称为鸟翼式互泵浦相位共轭镜,其光路如图 2c 所示。鸟翼式互泵浦相位共轭镜具有较大的动态范围,较宽的角度响应范围,其相位共轭反射率依赖于入射角,最大相位共轭反射率对应的入射角近似等于晶体的布儒斯特角。

1989年, Sharp 等^[19]利用掺铈 SBN 及 BaTiO₃ 和 KNSBN 晶体实现了桥式互泵浦相位共轭镜,其光路如图 2d 所示。两束泵浦光从晶体的相对两面入射,两束光不需在晶体内部反射,而是直接牵线搭桥形成耦合通道,形成所谓的“桥”式结构,产生相位共轭光。不久, Wang 等^[20]让两束泵浦光从晶体的相邻两面入射,两束光直接发生耦合,形成了如图 2e 所示的另一种桥式互泵浦相位共轭镜。

1990年, Ewbank 等^[21]利用两束光从掺铈 SBN 晶体的两个表面入射,两束光在晶体内部经过三次内反射,形成耦合通道,产生两束光的相位共轭光。由于这种相位共轭镜中的光束通道形似蛙腿,如图 2f 所示,因此被称为蛙腿式互泵浦相位共轭镜。

所有的互泵浦相位共轭过程都依赖于光折变受激散射效应,它们的物理机制几乎是完全相同的。当光射入到光折变晶体中的时候会产生光散射,入射光与散射光由于相干将在晶体中建立取向各异的折射率光栅,互泵浦相位共轭镜的两束入射光都有自己的一套光栅,由于这些光栅之间的竞争,最后晶体中将存在一个或多个特定取向的光栅,每一束入射光在光栅上衍射成为另一束光的相位共轭光,这就是所谓的共享光栅理论^[22]。根据晶体内部光栅(或作用区)的个数的不同可将互泵浦相位共轭镜分为两类,双相位共轭镜属于单区四波混频自振荡机制,其它均为双作用区机制。

互泵浦相位共轭镜自从被发现以来,就受到人们的重视,对其基本性质及在不同材料中的实现进行了很多有价值的研究。1992年, Wolffer 等^[23]在半导体材料掺铁磷化铟(Fe: InP)中观察了双相位共轭镜和双色泵浦振荡器的形成。并利用 Fe: InP 在其通带边缘的光折变性质,对波长为 985nm 和 1047nm 的光波分别得到了 63% 和 26% 的转换效率。

1993年, Kamshilind 等^[24]尝试了在类似光纤状的长 10cm 的 BTO 晶体中实现互不相干光束的耦合,在有外加电场,波长为 632.8nm,入射功率为 24mW 时得到了近 70% 的相位共轭反射率。

1994年, Gao 等^[25, 26]测试了 Cu: KNSBN 晶体中几种互泵浦共轭镜的相位共轭反射率,对鸟翼式相位共轭镜得到了 28% 的相位共轭透射率和 48% 的反射率;对第一种桥式互泵浦相位共轭镜,当入射光强比为 25 时,最大共轭反射率高达 500%,最大透过率为 58%;对第二种桥式互泵浦相位共轭镜,当光强比为 6 时,得到的最大相位共轭反射率为 160%。

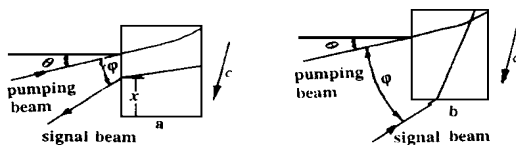


Fig. 3 Schematic diagram of induced mutually pumped phase conjugator

1995 年,孙秀冬等^[27-29]提出了一种既包括自泵浦相位共轭过程又包括互泵浦相位共轭过程的新型相位共轭镜——诱导互泵浦相位共轭镜,其光路如图 3a 所示。两束激光从 Cu:KNSBN 晶体的同一表面入射,其中泵浦光以易于“猫式”自泵浦相位共轭反射的方向与位置入射到晶体,当泵浦光产生自泵浦相位共轭反射光以后,信号光也会产生相位共轭反射输出。泵浦光的相位共轭反射光以自泵浦成分为主,信号光的相位共轭反射光以互泵浦成分为主。由于该相位共轭镜中信号光的相位共轭反射光是在泵浦光的自泵浦相位共轭反射光的诱导下产生的,因此,这种相位共轭镜被称为诱导互泵浦相位共轭镜。

实验表明,对于诱导互泵浦相位共轭镜,两束入射光的相干性越好,信号光的相位共轭反射率就越高。实验还表明,诱导互泵浦相位共轭镜具有相当大的输入功率动态范围,对信号光没有明显的阈值要求。另外,诱导互泵浦相位共轭镜的信号光入射角度及入射位置具有很大的调节范围,即使当信号光从泵浦光入射面的侧面入射时(如图 3b 所示),也可产生相位共轭光。诱导互泵浦相位共轭镜产生相位共轭光的过程中既包括互泵浦过程又包括自泵浦过程,其机理与其它互泵浦相位共轭过程完全不同,文献^[29]用多作用区模型对该过程进行了分析与解释。

三、光折变相位共轭镜的应用

光折变晶体具有非线性系数大、灵敏度高、耦合效率高以及低功率响应等许多优点,在很低的光强下就可呈现很大的非线性,是实现光学相位共轭的极好的材料。光折变相位共轭镜能理想地消除光波的相位畸变,具有相当好的图像保真度和自准直作用,因而在全息联想存储、图像处理、光通讯、光计算、联合变换相关器等方面得到了广泛的应用。

近年来,光折变相位共轭镜在全息联想存储方面的应用受到了人们的普遍重视。1986 年, Soffer 等人^[1]利用由 BaTiO_3 晶体构成的相位共轭镜,最先实现了全息联想存储;1992 年,王凡等^[30]利用“猫式”自泵浦相位共轭镜完成了全息联想存储;1995 年, Duelli 等^[31]利用光折变相位共轭镜实现了多重全息联想存储;1996 年, Sun 等^[32]利用诱导互泵浦相位共轭镜实现了全息联想存储,用原始图像的 50% 的信息寻址,得到了原始图像的完整的再现像。

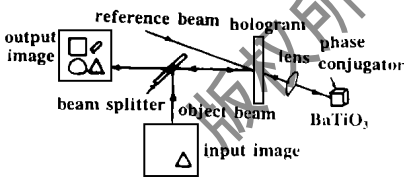


Fig. 4 Schematic diagram of holographic associative memory

联想存储的原理如图 4 所示。物光束与参考光束在全息记录介质中相干涉,写入原始物的全息图。当用物光束或物光束的一部分对全息图寻址时,会产生沿参考光方向传播的衍射光,该光束射到光折变相位共轭镜上产生反向传播的相位共轭光,此相位共轭光入射到全息图上,经衍射后便得到了原始物光束,再现原始图像,该图像包含了原始图像的全部信息。全息

联想存储可以由部分输入信息再现完整信息,具有联想、记忆等功能,向光学神经网络迈进了一步。

除联想存储以外,国内外近年来对光折变相位共轭镜在其它方面的应用也有大量的报道。1992 年, Sharp 等^[33]利用自泵浦相位共轭镜实现了从非相干图像向相干图像的转换;1994 年, Khoury 等^[34]提出了一种利用光折变二波耦合及自泵浦相位共轭镜的联合变换相关器,得到了可与相位匹配滤波器相媲美的识别结果;1996 年,孙秀冬等^[35]利用诱导互泵浦相位共轭镜实现了图像的相减操作;1996 年, Aderson 等^[36]利用桥式互泵浦相位共轭镜完成了图像传输,

实现了瞬态条件下的信息交换。限于篇幅,我们对这些应用不再具体叙述。

总之,光折变相位共轭镜从一出现,就因其非同寻常的特性而引起人们极大的兴趣和关注,对其性质和产生机理以及应用进行了广泛而深入的研究。其应用领域正在日益扩大,并逐渐向实用化方向发展。

参 考 文 献

- 1 Soffer B H, Dunning G J, Owrchko Y *et al.* Opt Lett, 1986; 11(2): 118
- 2 Anderson D Z, Lininger D M, Feinberg J. Opt Lett, 1987; 12(2): 123
- 3 He Q, Duthie J G, Gregory D A. Opt Lett, 1989; 14(11): 575
- 4 White J O, Cronin-Golomb M, Fischer B *et al.* A P L, 1982; 40(5): 450
- 5 Cronin-Golomb M, Fischer B, White J O *et al.* IEEE J Q E, 1984; 20(1): 12
- 6 Feinberg J. Opt Lett, 1982; 7(7): 486
- 7 Cronin-Golomb M, Fischer B, White J O *et al.* A P L, 1983; 42(8): 919
- 8 Chang T Y, Hellwarth R W. Opt Lett, 1985; 10(3): 408
- 9 Lian Y, Gao H, Ye P X *et al.* A P L, 1993; 63(13): 1745
- 10 Lian Y, Dou S X, Gao H *et al.* Opt Lett, 1994; 19(9): 610
- 11 Lian Y, Dou S X, Zhang J *et al.* Opt Commun, 1994; 110(1/2): 192
- 12 Lian Y, Gao H, Dou S X *et al.* Appl Phys B, 1994; 59(6): 655
- 13 Dou S X, Gao H, Zhang J *et al.* J O S A(B), 1995; 12(6): 1048
- 14 Dou S X, Zhang J, Wang M G *et al.* J O S A(B), 1995; 12(6): 1056
- 15 Ye P X. SPIE, 1996; 2896: 62
- 16 Weiss S, Stemklar S, Fisch B. Opt Lett, 1987; 12(2): 114
- 17 Smout A M C, Eason R W. Opt Lett, 1987; 12(7): 498
- 18 Ewbank M D. Opt Lett, 1988; 13(1): 47
- 19 Sharp E J, Clark W W, Miller M J *et al.* Appl Opt, 1990; 29(6): 743
- 20 Wang D, Zhang Z, Zhu Y *et al.* Opt Commun, 1989; 73(6): 495
- 21 Ewbank M D, Vazquez R A, Neurgaonkar R R *et al.* J O S A(B), 1990; 73(12): 2306
- 22 Ewbank M D. Opt Lett, 1988; 13(1): 47
- 23 Wolfer N, Gravey P, Picoli G *et al.* Opt Commun, 1992; 89(1): 17
- 24 Kamshilin A A, Ravattinen R, Tuovinen H *et al.* Opt Commun, 1993; 103(3/4): 221
- 25 Gao X, Sasaki A, Zheng Y. Opt Commun, 1994; 106(4): 258
- 26 Gao X, Sasaki A, Zheng Y *et al.* SPIE, 1994; 2321: 568
- 27 Sun X, Zhang Z, Zhou Z *et al.* Chinese Phys Lett, 1995; 12(9): 533
- 28 Sun X, Xu K, Sun W *et al.* Journal of HIT, 1995; 2(1): 15
- 29 孙秀冬. 诱导互泵浦相位共轭反射的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1995
- 30 王 凡, 张以谟. 光学学报, 1992; 12(1): 49
- 31 Duelli M, Cudney R S, Keller C *et al.* Opt Engng, 1995; 34(7): 2044
- 32 Sun X, Zhou Z, Li Y *et al.* Opt Engng, 1996; 35(8): 2153
- 33 Sharp E J, Wood J L, Clark W W *et al.* Opt Lett, 1992; 17(3): 207
- 34 Khoury J, Kane J S, Asimellis G *et al.* Appl Opt, 1994; 33(35): 8216
- 35 孙秀冬, 周忠祥, 李 焱 *et al.* 光学学报, 1996; 16(2): 223
- 36 Aderson R J, Sharp E J, Wood J L *et al.* Appl Opt, 1996; 35(5): 854

* * *

作者简介: 侯春风, 男, 1970年4月出生。博士生。从事光折变非线性光学及激光技术的研究工作。