

# 光折变光放大器

郭儒 凌振芳 刘思敏 张光寅

(南开大学物理系, 天津 300071)

光折变相干光放大与量子相干光放大不同,前者是基于光折变效应和光的干涉、衍射现象实现的一种光像放大,因此具有重要的应用价值。由于光折变晶体可在低光功率下产生显著的光折变效应,应用半导体激光器和光折变效应的这一特点,可以想象,像半导体三极管一样的光折变光放大器也会问世。讨论了光折变光放大器的工作原理,并指出它的可能潜在应用

当一束光通过介质后,如果能产生出比输入光还强的输出光,那么这种光学介质称为光放大介质。例如,当光辐射通过二能级( $E_2 > E_1$ )系统时,在这两个能级之间将发生光吸收和受激发射。受激发射率和吸收率分别正比于高低能级上的电子占据数。当高能级上的占据数多于低能级上的占据数时,从高能级到低能级的受激发射增益将大于由低能级到高能级的吸收所引起的损耗,从而导致了辐射的加强,实现了光放大。受激过程是一种在特定模式上增添新光子的过程,因此受激发射光与入射在介质上的光辐射具有相同的频率、偏振、传播方向和确定的位相关系。这种光放大是激光器工作的基本原理,通常称为量子相干光放大。可见,量子相干光放大是通过在激活介质中的受激发射过程实现的。它要求介质在外部激励下实现粒子数反转分布。近年来,人们在一种称之为光折变晶体的材料中,通过记录实时动态相位栅,发现了很强的相干光放大。这种相干光放大不同于上述量子相干光放大,它是通过光折变效应,电光效应在光折变晶体内写入动态体相位栅,在该相位栅的耦合作用下引起光能流的不可逆转移的结果<sup>[1]</sup>。这种光放大器十分有效,用光折变晶体制成的光折变放大器,其增益系数为 $10-100\text{cm}^{-1}$ 。这个量级已远远地超过了用于激光器的活性介质,如红宝石、钕玻璃的增益系数。最近人们用半绝缘的 AlGaAs-GaAs 多量子阱作光放大实验,增益系数高达 $1000\text{cm}^{-1}$ <sup>[2]</sup>。光折变光放大无疑对光学信息放大开辟了一条

崭新的途径。

光折变效应是指一些不纯洁的电光晶体,经相干光辐射,由干涉条纹的空间分布引起的光致空间电荷分离,进而形成相应的局域空间电荷场。后者通过线性或二次电光效应引起折射率的空间调制变化,或者说在晶体中写入了体相位栅。写入光束在这种自写入的实时动态相位光栅的耦合作用下,将引起写入光的振幅、位相、偏振乃至频率的变化,并发生相互转移。此外,在光折变晶体内所发生的各种受激过程中,还可能产生出一束与信号光相位复共轭的相位共轭光(例如自泵浦相位共轭光)。它像一件馈赠品,使人们有可能实现实时光学处理。可以说光折变效应为光学信息的全方位处理提供了一种重要的实施手段。在所有这些应用中,都要涉及光能流的不可逆转移的光放大过程。下面从光的干涉和衍射理论出发,讨论这种光折变光放大器的工作原理,并指出它的可能潜在应用。

当一束泵浦光  $A_p$  和一束相干的信号光  $A_s$  同时照射在光折变晶体上时,它们的干涉条纹通过光折变效应在晶体内写入动态体相位栅。假定所记录的相位栅是相移型的,即相位栅的一级傅里叶分量的分布较干涉条纹的分布超前  $\pi/2$  位相,如图 1(a) 所示。在图 1(a) 中实线(代表干涉条纹分布)相对于虚线(代表相位栅的折射率指数分布)沿光栅波矢  $K(=k_p - k_s)$  方向前移了  $\Lambda/4$  距离,  $\Lambda$  是光栅周期 ( $\Lambda = 2\pi/K$ )。泵浦光  $A_p$  和信号光  $A_s$  经自写入的相

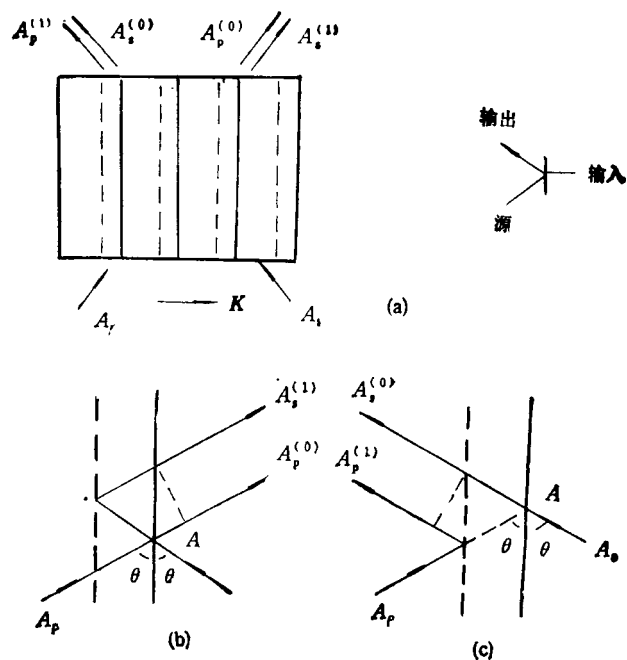


图1 (a) 光折变光放大器和半导体三极管的对比;  
(b) 和 (c) 光折变光放大器的放大原理

移型光栅发生布拉格衍射, 分别被衍射至各自的对方方向上, 从而使从晶体上出射的光是原来的透射光(零级衍射光)和经相位栅衍射后的对方一级衍射光的叠加成光。具体地说, 沿  $A_s$  方向的出射光是  $A_s$  的透射光  $A_s^{(0)}$  和  $A_p$  经相位栅衍射后的一级衍射光  $A_s^{(1)}$  的相长相干光; 沿  $A_p$  方向的出射光是  $A_p$  的透射光  $A_p^{(0)}$  和  $A_s$  经相位栅衍射后的一级衍射光  $A_p^{(1)}$  的相消相干光。因此  $A_s$  光被放大,  $A_p$  光被削弱。相长, 相消由同方向传播的两束光的位相差所决定, 具体分析如下: 按照相位栅的衍射理论,<sup>[3]</sup> 一级衍射光较零级衍射光落后  $\pi/2$  位相。由图 1(b) 可见,  $A_s$  经相位栅衍射的一级衍射光  $A_s^{(1)}$  较  $A_p$  的透射光  $A_p^{(0)}$  多走了光程  $\Delta$

$$\Delta = 2 \frac{\Lambda}{4 \sin \theta} - 2 \frac{\Lambda}{4} \operatorname{ctg} \theta \cos \theta = \frac{\Lambda}{2} \sin \theta.$$

对于布拉格衍射, 关系式  $2\Lambda \sin \theta = \lambda$  成立。这就是说  $A_s^{(1)}$  较  $A_p^{(0)}$  多走了  $\lambda/4$  光程, 因而  $A_s^{(1)}$  较  $A_p^{(0)}$  落后  $\pi/2$  位相。又由于经相位栅衍射的一级衍射光  $A_s^{(1)}$  较其读出光落后  $\pi/2$  的位相 [ $A_p$  与  $A_s$  在图 1(b) 中的  $A$  点具有相同的位

相], 所以  $A_s^{(1)}$  与  $A_p^{(0)}$  具有  $\pi$  的位相差, 它们沿同方向传播, 故发生相消相干, 使  $A_p$  方向的出射光强减弱。同理由图 1(c) 可见,  $A_s^{(0)}$  较  $A_p^{(1)}$  多走了  $\lambda/4$  光程, 因而  $A_s^{(0)}$  较  $A_p^{(1)}$  落后  $\pi/2$  位相。考虑到经相位栅衍射的  $A_p^{(1)}$  较  $A_s^{(0)}$  落后  $\pi/2$  位相后,  $A_s^{(0)}$  和  $A_p^{(1)}$  以同相位沿同方向传播, 故发生相长相干, 使沿  $A_s$  方向的出射光强加强。由上分析可见, 在光折变相位栅的耦合作用下, 损耗了泵浦光, 放大了信号光。信号光的放大是以耗尽泵浦光为代价的。同时从图 1(b) 和 (c) 的几何关系可以看出, 当入射光的人射方向与相位栅相对干涉条纹的移动方向一致时, 该入射光将得到放大。而相位栅相对干涉条纹的移动方向取决于光折变晶体的取向及载流子的电性。

实际上, 由于在光折变晶体内所写入的是体相位栅, 因此光栅的衍射和光束之间的耦合是同时发生的, 并随传播距离不断加强。所以, 光的相长、相消是一个不断累积的多光束干涉过程(图 2)。

不妨将光折变光放大器与半导体晶体管对

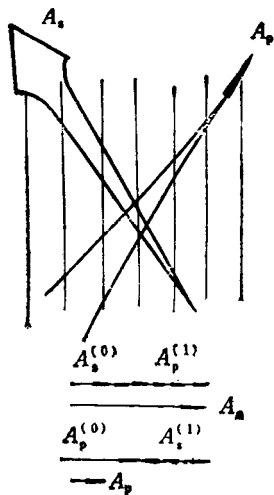


图2 体相位栅的光放大过程

电信号的放大作一对比 [图 1(a)]. 在光折变光放大器中, 干涉条纹中的泵浦光对应晶体管中集电极的电源. 输入信号光对应晶体管基极上的输入电流. 放大的输出信号光对应发射极电流. 所不同的, 也是最重要的是晶体三极管只对一维时序信号实现放大, 而光折变光放大器则是对信号光二维图像的并行实时放大. 显然光折变晶体的这种光像放大特性与它的高存储信息能力, 在当今信息时代将会有广阔的应用前景.

对于局域响应的介质, 即相位栅相对干涉条纹分布没有空间相移, 由图 1 可知将不产生光放大. 然而如果改用多光束入射光折变晶体, 例如进行简并四波混频 (图 3), 仍可实现对信号光的光放大, 不仅如此, 还可以产生出信号光的相位共轭波, 这是十分有用的. 所以会出现这种结果是由于光束对 1, 4 和 2, 3 分别写入了两组相位栅 (图 3). 这两组相位栅彼此有  $\Lambda/4$  的空间位移. 图 3 中的虚线代表由光束 2 和 3 写入的相位栅, 光栅波矢为  $K_2 = k_3 - k_2$ . 实线代表由光束 1 和 4 写入的相位栅, 光栅波矢为  $K_1 = k_1 - k_4$ , 而且  $K_1 = K_2 = K$ . 光束 1 和 4 虽不能通过自写入的光栅  $K_1$  实现双光束耦合, 然而它们可通过光束 2 和 3 写入的光栅  $K_2$  实现双光束耦合, 按照图 3 的配置, 将导致光束 4 (信号光) 放大, 光束 1 (泵浦光) 减弱. 同

物理

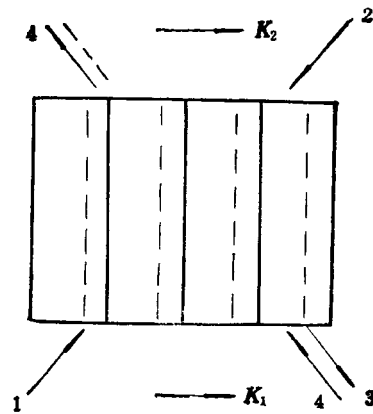


图3 简并背向四波混频

时当泵浦光 2 沿着光束 1 的反方向入射时, 经光束 1 和 4 写入的光栅  $K_1$  布拉格衍射至光束 4 的反方向上, 形成衍射光 3. 光束 3 与光束 4 传播方向相反, 其位相处处与信号光 4 保持复共轭, 因此光束 3 是信号光 4 的相位共轭光波. 这就是说在局域响应的光折变晶体内, 通过四波混频写入两组彼此错位  $\Lambda/4$  的相位栅, 不仅使信号光得到放大, 而且还产生出一束信号光的相位共轭波. 为什么由光束 1, 4 写入的光栅  $K_1$  相对于光束 2, 3 写入的光栅  $K_2$  沿  $K$  方向前移  $\Lambda/4$  的距离呢? 这可作如下理解: 由于光束 3 是光束 2 经相位栅  $K_1$  布拉格衍射的一级衍射光, 它相对光束 2 落后  $\pi/2$  位相. 假定入射光束 1, 4 和 2 具有相同的初位相, 由于光束 3 较光束 2 落后  $\pi/2$  位相, 所以光束 2 和 3 所形成的干涉极大对应的位相差  $\delta_2 = (k_3 \cdot r + \pi/2) - k_2 \cdot r = K_2 \cdot r - \pi/2 (= m \times 2\pi, m$  为整数). 光束 1 和 4 所形成的干涉极大对应的位相差  $\delta_1 = k_1 \cdot r - k_4 \cdot r = K_1 \cdot r (= m \times 2\pi)$ . 因此, 光束 2, 3 形成的干涉条纹相对光束 1, 4 形成的干涉条纹沿光栅波矢  $K$  方向后移  $\Lambda/4$  距离. 对于局域响应的介质, 干涉条纹的位置也就是相位光栅的位置, 这意味着由光束 2, 3 写入的相位栅 (图 3 中的虚线) 相对于光束 1, 4 写入的相位栅 (图 3 中实线) 沿光栅波矢  $K$  后移了  $\Lambda/4$  距离. 在光折变晶体内同时写入两组错位  $\Lambda/4$  的相位栅. 在这种情况下, 弱信号光总是被放大, 并产生出它的相位共轭波, 与晶

体的取向和载流子的电性无关。利用信号光的相位共轭波,可使畸变的图像获得高保真的复原。显然这种实时全息术对图像处理十分重要。

如上所述,光折变光放大实际上是光波在光折变晶体内自写入的相位栅的耦合作用,产生的光能流不可逆转移。它是光的衍射和干涉的结果。这种全息相干光放大不仅与量子相干光放大工作原理不同,而且不产生量子噪音,其本身的噪音(如光扇噪音)还可以通过各种技术加以限制。此外,全息相干光放大还具有较高的增益系数。这种光放大可实现大像场面的光

像放大。人们还可作进一步设想,利用薄片光折变晶体的光爬行效应<sup>[4]</sup>,可以将这种光放大器微型化,制成微小型光放大器件,它与半导体激光器相配合,将开辟微型化的光学器件时代。

- [1] P. Gunter and J.P. Huignard, eds., *Photorefractive Materials and Their Applications*, I and II Vols. 61 and 62 of *Topics Appl. Phys.*, Springer-Verlag, Berlin, (1988, 1989).
- [2] Q. Wang et al., *J. Opt. Soc. Am. B*, **9** (1992), 1626.
- [3] L. Solymen and D. J. Cooke, *Volume Holography and Volume Gratings*, Academic Press, London, (1981), 37-40.
- [4] J. Zhang et al., *Opt. Lett.*, **18**(1993), 1391.

## 铁电致冷技术——一种可能的新型室温致冷技术

肖定全 杨斌 朱建国 钱正洪 杜晓松

(四川大学材料科学系,成都 610064)

利用铁电材料的电生热效应(即逆热释电效应),可以制作致冷器。近年的研究进展表明,铁电致冷有可能发展成为一种新型的室温致冷技术。扼要介绍了铁电致冷的基本原理,可行性,前期工作与研究现状,并预示了其发展前景。

**关键词** 电生热效应,铁电材料,致冷器

### Abstract

Cryogenic refrigeration could be realized by using the electrocaloric effect (i.e. inverse pyroelectric effect) of ferroelectric materials. Recent progresses showed that ferroelectric refrigeration will be a new possible technique of cryogenic refrigeration working near room temperature. The fundamentals, feasibility, previous work and present researches, and the prospect of the research field are briefly introduced in this paper.

**Key words** electrocaloric effect, ferroelectric materials, refrigerator

目前,制冷设备和空调器普遍采用的致冷物质为氟里昂(CFC)。它是消耗大气臭氧层和增加温室效应的主要有害物质之一。根据《保护臭氧层维也纳国际公约》,《关于消耗臭氧物质的蒙特利尔议定书》和《中国消耗臭氧层物质逐步淘汰国家方案》,为保护人类生存的生态环境,需逐步停止生产,最终废除 CFC 物质。因此发展不含 CFC 的冰箱及其他致冷器是摆在

科学家和工程技术人员面前的一个刻不容缓的重大课题。就解决方法而言,现在人们主要从两个方面来考虑:一是研制 CFC 的代用材料,但尚未找到性能完善的代用品;二是根据不同的致冷原理,寻找新的致冷材料,研制新型致冷器。正因为此,利用铁电材料的电生热效应(即逆热释电效应),采用绝热去极化致冷的原理研制新型的致冷器,便成为一项颇具吸引力的研究课