

光学相位共轭技术

李 家 泽

光学相位共轭技术就是利用非线性光学的方法来实现某一光波的波前或相位逆转的技术。因为这在数学上等效于某一光波的复振幅作复共轭变换，所以通常就把获得和应用某一光波的相位共轭光波的技术称为光学相位共轭技术。

相位共轭光波是1972年首先由苏联科学家Зельдович等人在受激布里渊散射 (SBS) 实验中发现的，他们的工作引起了人们的重视。1976年Yariv从理论上证明采用三波混频 (TWM) 可以获得相位共轭光波，但利用这种方法需要严格的相位匹配，从而给应用带来困难。1977年Hallwarth提出可以利用简并四波混频 (DFWM) 的方法来获得相位共轭光波，利用这种方法对任何方向的入射光波均可自动满足相位匹配条件，Hallwarth的工作大大地推动了光学相位共轭技术的发展。到现在人们已经可以用不同的方法，在不同的物质状态中获得相位共轭光波，并且还开展了对相位共轭光波的应用研究。目前，相位共轭技术已发展成非线性光学中一个独立的具有丰富内容的前沿课题。掌握了产生相位共轭光波的技术途径和实验方法以后，就可以解决有关相干光的传输、探测、放大与信息处理等领域中的一些重大技术难题。因此，开展光学相位共轭技术的研究不仅丰富了非线性光学本身的内容，而且具有重大的经济价值。

一、什么是相位共轭光波

设在非均匀的介质中，有一束沿Z轴传播的光波，其光波电场为：

$$\bar{E}_1(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \bar{E}_1(\vec{r}) \exp [i(\omega t - RZ)] + C \cdot C$$

式中， $\bar{E}_1(\vec{r})$ 为光波电场的复振幅， $\bar{E}_1(\vec{r})$ 与 \vec{r} 的关系包含着光波电场的信息，畸变和衍射等因素所造成的空间调制，设可具体表示为：

$$\bar{E}_1(\vec{r}) = A(\vec{r}) \exp [i\phi(\vec{r})]$$

式中， $A(\vec{r})$ 、 $\phi(\vec{r})$ 均为实数。

若在Z方向还存在另一光波，其光波电场为：

$$\bar{E}_2(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \bar{E}_2(\vec{r}) \exp [i(\omega t \pm RZ)] + C \cdot C$$

并且其复振幅 $\bar{E}_2(\bar{r})$ 满足如下关系:

$$\bar{E}_2(\bar{r}) = \bar{E}_1^*(\bar{r}) = \bar{A}(\bar{r}) \exp[-i\phi(\bar{r})]$$

则我们定义 $\bar{E}_2(\bar{r}, t)$ 所表示的光波为 $\bar{E}_1(\bar{r}, t)$ 的背向相位共轭光波(当“RZ”为“+”时)或前向相位共轭光波(当“RZ”为“-”时)。

显然,背向相位共轭光波的传播方向与 $\bar{E}_1(\bar{r}, t)$ 的方向相反,复振幅为其共轭,相位(或波前)的空间分布相同;前向相位共轭光波的传播方向与 $\bar{E}_1(\bar{r}, t)$ 的方向相同,复振幅也为其共轭,相位(或波前)的空间分布呈镜象对称。

若将上述的数学关系式用物理图象表示,则可形象地看到相位共轭光波与普通的反射光波或折射光波的区别。

图1中的PCM, PCL分别表示相位共轭反射镜和相位共轭透镜,它们分别是能够产生背向相位共轭光波和前向相位共轭光波的非线性光学元件,具体的结构后面予以说明。A和A'表示性质完全相同的两块畸变介质。

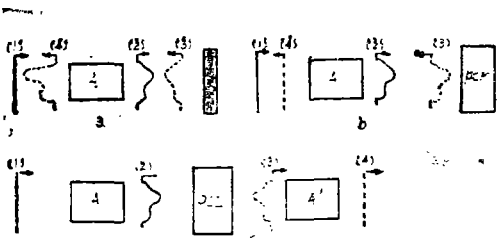


图1

如图1所示,入射平面波(1),通过畸变介质A以后,透射波已不是平面波,设变成了(2)的形状。图1a表示(2)经一般反射镜反射后,反射波波前的形状如(3)所示,再次通过畸变介质后畸变加倍,如(4)所示,显然(4)和(1)相比,存在着波前畸变。

图1b表示(2)经PCM后产生一背向相位共轭光波(3),其波前形状与(2)完全相同,(3)再次通过畸变介质后畸变完全相消,其波前形状(4)与入射波(1)形状相同,仍为一平面波。图1c表示(2)经PCL后产生一前向相位共轭光波(3),其波前形状与(2)呈镜象对称,若在PCL的后方还有一块与A完全相同的畸变介质A',则(3)再次通过畸变介质A'后,畸变完全相消,透射波(4)是与入射波(1)形状完全相同的平面波。

据此不难看出,相位共轭光波具有修正波前畸变的能力。众所周知,任何传递信息的激光束,总是避免不了各种光学元件或大气的传输环节,而任何传输环节总不可能是理想均匀的,这样必然给传输信息光束的波前带来畸变,这种畸变相对于所传输的信息来说,是一种有害的噪声。利用相位共轭技术来修正这种波前畸变,将是一种十分有效的方法。不过需要特别指出的是相位共轭光波必须两次通过畸变介质才能达到修正波前畸变的目的,而这种双程传输过程对某些应用来说是能自动满足的。

二、产生相位共轭光波的理论解释

从本质上讲相位共轭光波都是由于强光作用下,介质内的感应非线性电极化效应所引起的,但具体的实验条件不同,它们产生相位共轭光波的物理过程也不一样,除上面已讲过的三种产生相位共轭光波的方法外,尚可用受激喇曼散射,光子回波,实时全息等方法来产生相位共轭光波,但最完善最实用的还是简并四波混频法,所以下面我们就以这种方法为例来解释相位共轭光波的产生机理。

简并四波混频产生相位共轭光波的原理如图 2 所示, 它利用的三阶非线性极化效应。

假设在非线性介质中有四个光波传播, 它们的波动方程统一表示为:

$$\bar{E}_j(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \bar{E}_j(\vec{r}) \exp[-i(\omega_j t - \vec{R}_j \cdot \vec{r})] + C.C$$

$$j = 1, 2, 3, 4$$

其中, $\bar{E}_1(\vec{r}, t)$, $\bar{E}_2(\vec{r}, t)$ 是频率为 ω 而传播方向相反的平面泵浦波, 因此有:

$$\vec{R}_1 + \vec{R}_2 = 0$$

$\bar{E}_4(\vec{r}, t)$ 是沿 Z 轴传播具有波前畸变的信号波, 其频率也为 ω , 而 $\bar{E}_3(\vec{r}, t)$ 则是我们所需要获得的与 $\bar{E}_2(\vec{r}, t)$ 的复振幅共轭的相位共轭波。本节的目的就是要利用非线性光学的理论证明: 在一定的条件下, 只要人为的在非线性介质上作用 $\bar{E}_1(\vec{r}, t)$, $\bar{E}_2(\vec{r}, t)$ 和 $\bar{E}_4(\vec{r}, t)$, 则一定能产生出 $\bar{E}_3(\vec{r}, t)$, 且 $\bar{E}_3(\vec{r}, t)$ 的复振幅是 $\bar{E}_4(\vec{r}, t)$ 的复振幅的复共轭。但由于证明过程中物理概念较多, 数学处理亦较麻烦, 所以下面我们就不详细推导了, 而只给出一些关键步骤, 详细过程请参阅参考文献 [1]。

由于在非线性介质上作用有强泵浦光 $\bar{E}_1(\vec{r}, t)$, $\bar{E}_2(\vec{r}, t)$ 和信号光 $\bar{E}_4(\vec{r}, t)$, 它们之间的非线性相互作用必然在介质中产生出如下的非线性极化强度:

$$P^{NL}(\omega = \omega + \omega - \omega) = \frac{3}{4} \chi^{(3)} \bar{E}_1(\vec{r}) \bar{E}_2(\vec{r}) \bar{E}_4^*(\vec{r})$$

$$\times \exp[-i(\omega t + RZ)] + C.C$$

由于介质中存在着上述极化波, 必然导致次波发射, 从而会形成一个沿 -Z 方向传播, 频率为 ω 的新光波, 我们将它记作 $\bar{E}_3(\vec{r}, t)$ 。又因为 $\bar{E}_1(\vec{r}, t)$, $\bar{E}_2(\vec{r}, t)$, $\bar{E}_3(\vec{r}, t)$, $\bar{E}_4(\vec{r}, t)$ 均是介质中传播的光波, 它们均应满足如下的波动方程:

$$\nabla^2 \bar{E}_j(\vec{r}, t) + \frac{\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{E}_j(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c} \frac{\partial^2}{\partial t^2} P^{NL}$$

解此非线性微分方程, 即可求得:

$$\frac{d\bar{E}_3(\vec{r})}{dz} = iK \bar{E}_4^*(\vec{r})$$

$$\frac{d\bar{E}_4(\vec{r})}{dz} = iK \bar{E}_3(\vec{r})$$

式中, K 为复耦合系数

$$K = \frac{2\pi\omega}{cn} \chi^{(3)} \bar{E}_1(\vec{r}) \bar{E}_2(\vec{r})$$

若泵浦光 $\bar{E}_1(\vec{r})$ 和 $\bar{E}_2(\vec{r})$ 在介质内衰减可忽略, 则上方程组的解析解为:

$$\bar{E}_3(z) = \frac{\cos|K|z}{\cos|K|L} \bar{E}_3(L) + i \frac{K^*}{|K|} \frac{\sin|K|(z-L)}{\cos|K|L} \bar{E}_4^*(0)$$

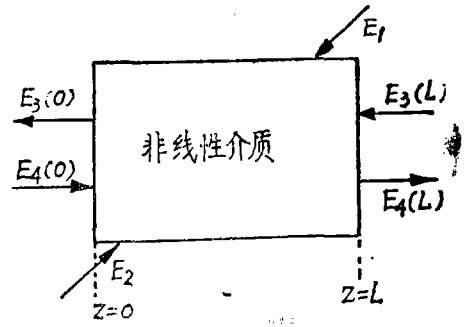


图 2

$$\bar{E}_4(Z) = -i \frac{|K| \sin |K|Z}{K \cos |K|L} \bar{E}_3^*(L) + \frac{\cos |K|(Z-L)}{\cos |K|L} \bar{E}_4(0)$$

式中, L 为非线性介质沿 Z 方向的长度, 若 $\bar{E}_3(L) = 0$, 则输入端 (即 $Z = 0$) 处的反射波为:

$$\bar{E}_3(0) = -i \frac{K^*}{K} \operatorname{tg} |K|L \cdot E_4^*(0)$$

该式表明 $\bar{E}_3(0)$ 正比于 $E_4^*(0)$, 故互为相位共轭波。

三、实验举例

这里仍以四波混频法为例介绍一种产生相位共轭波的具体实验方法, 其实验装置如图 3

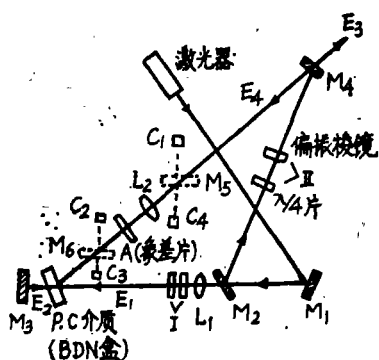


图 3

所示。图中 M_1, M_3 为全反镜。来自激光器的能量约为 70mJ , 脉宽约为 13ns 的激光脉冲, 经 M_1 反射后作为 E_1 , 再经 M_3 反射后作为 E_2 , E_1, E_2 是频率相同, 传播方向相反的泵浦波。激光器与 M_3 之间在光学上用偏振器加 $\frac{1}{4}$ 波片组成的隔离器 I 分隔开, E_1 经透镜 L_1 聚焦在反射镜 M_3 上。非线性介质是 BDN 染料的甲苯溶液 (装在染料盒中)。泵浦光束在染料盒上的光斑尺寸 (90% 能量的直径) 是 0.58mm 。信号波 E_4 取自反射系数为 4% 的分束镜 M_2 , 由 M_2 反射的激光束经隔离器 II, 半反镜 ($R = 50\%$) M_4 和

透镜 L_2 后射向染料盒, 它与泵浦光之间具有一定的夹角。信号波在染料盒上的直径约为 0.45mm 。在该实验条件下, 沿信号波的反方向可观察到它的相位共轭波。

为了形象地说明相位共轭光波的存在及其修正波前畸变的能力, 我们可以人为地在 L_2 和染料盒之间插入一块能够产生波前畸变的象差片 A, 然后在相差片前后各放入一块分束镜 M_5, M_6 , 并把照象机分别放置在 C_1, C_2, C_3 和 C_4 的四个位置上, 分别用以拍摄无波前畸变的信号波, 波前畸变的信号波, 波前畸变的相位共轭光波和双程通过象差片后的相位共轭光波, 其光斑形状如图 4 (a)、(b)、(c)、(d) 所示。

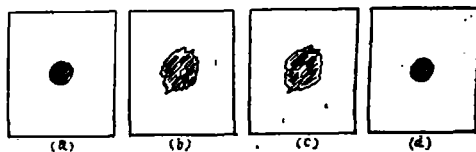


图 4

比较 (a) 和 (d) 的形状, 可生动地说明相位共轭光波双程通过畸变介质后确有修正波前畸变的能力。

需要指出的是, 图 3 中信号波与泵浦波之间的夹角在作图时被夸大了, 在实际的光路中, 它们之间的夹角一般均是很小的, 通常都在约 $10 \sim 100\text{mrad}$ 量级, 这样才能为信号波与泵浦之间提供足够的相互作用长度。关于本实验的具体细节可参考文献 [2]。

上述实验是用 BDN 的甲苯溶液作为非线性介质, 实际上, 可用来产生相位共轭光波的非线性介质种类是很多的, 例如晶体 Si , 红宝石, 液体的 CS_2 , 气体的 SF_6 , 半导体的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 液晶的 MBBA 等。尽管种类繁多, 但它们均分属于共振型和非共振型两大类。一

般说共振型介质都有较高的 $\chi^{(3)}$ ，从而可获得较高的转换效率。例如BDN属共振型介质，实验结果可获得 $Z_4(E)/E_3(Z) \approx 600\%$ ，相位共轭光波所增加的这部分能量显然是通过非线性相互作用由泵浦波转换而来的。

四、应用举例

前面已讲过，相位共轭光波具有修正波前畸变的能力，无疑这在光学信息处理，自适应光学等领域中均有用武之地，此处不再赘述。下面简单介绍一下相位共轭技术在激光技术方面的两个应用。

1. 相位共轭反射镜用于激光谐振腔

激光器往往由于工作物质和其它腔内元件的光学不均匀性或热畸变而使输出光束质量变差，这是许多激光应用课题中感到很头痛的问题，目前尚无理想的解决办法。但若将谐振腔的一块或两块反射镜用相位共轭反射镜来代替，则激光束在腔内来回反射一次就可自动补偿腔内各种象差元件引起的波前畸变，从而有可能获得输出质量很高，近于衍射极限的理想光束。

2. 相位共轭反射镜用于激光核聚变

在激光核聚变中需要用多路强激光同时精确的瞄准在一个很小的目标上，欲做到这一点往往是困难的。首先强激光束必须通过放大才能获得，这将导致高阶模的出现，要将各高阶模精确地聚焦到一个小目标上，在技术上是困难的。其次强激光在传输过程中必然导致光路中光学元件和介质产生畸变和光束自聚焦，从而也将使光束质量变差，最后的结果均是使功率密度迅速降低。如果将相位共轭镜用于激光核聚变中，则会使上述困难迎刃而解，如图5所示，用低功率的激光器来照明目标（低功率激光器易于获得较好的模式）如(a)所示，由目标反射的激光束经透镜变成平行光，该平行光通过分束镜后经激光放大器放大，光束功率密度增高，但光束质量变差，波面产生畸变，如(b)所示。当该畸变波前经相位共轭反射镜反射后，将会产生一个后向相位共轭光波，如(c)所示。再经过一次激光放大，功率密度再一次增强，同时波前畸变得到修正，仍恢复为平面波，经透镜聚焦后就可以以极高的功率密度极准确的精度瞄准在目标上，如(d)所示，从而获得满意的核聚变效果。

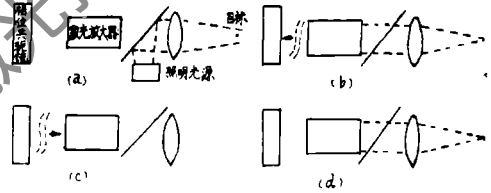


图5

从原理上讲光学相位共轭技术有着很广泛的技术应用前景，但到目前为止，真正的实际工程应用尚不多见，还有待进一步研究开发，如何将这些潜在应用的可能性变成现实，还需我们努力工作。

参 考 文 献

- [1] 西北电讯工程学院，《非线性光学》（下册）。
- [2] E. I. Moses and F. Y. Wu, Opt. Lett., 1980, Vol. 5, No. 2, P. 64~66.