

## 对撞锁模中的瞬态饱和光栅问题

汪 中

(北京大学无线电系)

**提要:** 本文讨论了饱和光栅的物理机制, 分析了对撞锁模中的瞬态饱和光栅现象及其作用。分析表明, 瞬态饱和光栅作用不足以用来解释对撞锁模技术提高饱和吸收体脉冲压缩效率的物理机制。

**关键词:** 对撞锁模, 瞬态饱和光栅

## On the transient saturation grating in CPM

Wang Zhong

(Department of Radio & Electronics, Peking University, Beijing)

**Abstract:** This paper discusses the mechanism of saturation grating and analyses the phenomena and function of transient saturation grating in CPM. The result of analysis shows that the mechanism of increasing the efficiency of pulse shortening with nonlinear absorber in CPM can not be fully explained by the transient saturation grating effect.

**Key words:** CPM, transient saturation grating

### 一、引 言

采用瞬态饱和光栅的概念来解释对撞锁模问题, 实际上从对撞锁模技术问世之初就开始了<sup>[1]</sup>。但是, 对于后向散射是怎么产生的, 它在脉冲压缩过程中是怎样起作用的, 对撞锁模中还有无其它提高可饱和吸收介质对脉冲压缩效率的物理过程存在等一系列具体问题, 却很难找到令人满意的答案, 甚至出现了概念上的混乱。以上问题的模糊不清给对撞锁模深入研究造成困难。因此, 进一步搞清对撞锁模中的瞬态饱和光栅问题是很有必要的。

### 二、饱和光栅问题

1976年 M. Sargent III 曾对增益介质中的饱和光栅问题作过较为详细的论述<sup>[2]</sup>。其中有一段很重要的话: “驻波场所产生的粒子数空间烧孔, 导致了介质饱和的增加, 并使稳态激光光强有一个相应的下降, 我们可以将这一现象直观地设想为在这里形成了一个 Bragg 光栅”。

Sargent 的描述清楚地指出, 驻波场在增益介质中所产生的饱和光栅作用, 本质上是粒子数空间烧孔导致的增益饱和加强。

Sargent 还给出了这一问题的数学推导。设驻波腔中电场由下式表示:

$$E(z, t) = E(t) \cdot \cos \nu t \sin kz \\ = \frac{1}{4i} E(t) \{ \exp(-i(\nu t - kz)) - \exp[-i(\nu t + kz)] \} + c.c. \quad (1)$$

电极化强度为

$$P(t) = -i \frac{p^2}{\hbar} ED(\omega - \nu) \frac{1}{M} \int_0^L dz \sin^2(kz) [\rho_{aa}(z) - \rho_{bb}(z)] \quad (2)$$

其中, 上下能级粒子数差为

$$\rho_{aa}(z) - \rho_{bb}(z) = \frac{N(z, t)}{1 + 2\left(\frac{\gamma_{ab}}{\gamma}\right) I |U(z)|^2 L(\omega - \nu)} \quad (3)$$

将(3)式展开至一次项:

$$\rho_{aa} - \rho_{bb} = N(z) \left[ 1 - 2\left(\frac{\gamma_{ab}}{\gamma}\right) I \sin^2(kz) L(\omega - \nu) \right] \quad (4)$$

(4)式代入(2)式, 并完成积分得

$$P(t) = -ip^2 \hbar^{-1} ED(\omega - \nu) \bar{N} \left[ 1 - \frac{3}{2} \left(\frac{\gamma_{ab}}{\gamma}\right) IL(\omega - \nu) \right] \quad (5)$$

如先将粒子数差在  $0-L$  区间作平均后再行积分则有

$$\overline{\rho_{aa} - \rho_{bb}} = \bar{N} \left[ 1 - \left(\frac{\gamma_{ab}}{\gamma}\right) IL(\omega - \nu) \right] \quad (6)$$

和

$$P(t) = -ip^2 \hbar^{-1} ED(\omega - \nu) \bar{N} \left[ 1 - \left(\frac{\gamma_{ab}}{\gamma}\right) IL(\omega - \nu) \right] \quad (7)$$

比较(7)、(5)两式可见, 饱和光栅作用使得  $P(t)$  有一个附加消减, 显然(5)式中第二项  $3/2$  中的  $1/2$  是由饱和光栅提供的。

造成  $P(t)$  这一附加衰减的物理机制是什么呢? 注意到这里驻波与光栅的相位是正好相反的, 看一下相位相同的情形将有助于弄清问题。将(4)式改写成如下形式:

$$\rho_{aa} - \rho_{bb} = N(z) [1 - 2(\gamma_{ab}/\gamma) I \cos^2(kz) L(\omega - \nu)] \quad (8)$$

将(8)式代入(2)式, 积分得

$$P(t) = -ip^2 \hbar^{-1} ED(\omega - \nu) \bar{N} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_{ab}}{\gamma}\right) IL(\omega - \nu) \right] \quad (9)$$

比较(9)、(7)两式, (9)式括号中第二项, 也即衰减项的绝对值减小了  $1/2$ , 与(5)式所得结果正好相反。从这里可以看到, “光栅”对驻波的增强或衰减, 是与两者之间的相位关系紧密相连的。实际上, (6)式的附加衰减正是由于“光栅”与驻波自然形成的相反相位而造成的。其物理机制是: 驻波波腹光强最强处即激励最强处, 正对应于增益最弱处; 而介质中增益最大处则正对应于驻波波节即激励最弱处, 这样, 总体平均来看, 增加了介质的增益饱和, 造成了光强的附加衰减。

为进一步说明这个问题, 我们可以将(1)中的驻波场改为行波场, 令其分别作用于(4)式那样的饱和光栅, 或者(6)式那样的均匀饱和介质, 结果与(7)式相同, 两者对光场的影响毫无差别。这一点可充分说明, 饱和光栅决非原有意义上的 Bragg 光栅, 空间粒子数烧孔导致的折射率调制并不对垂直调制截面通过的光场强度造成影响。真正对光强造成影响的是驻波光场与饱和光栅的位相关系。所谓“饱和光栅的后向散射”只是为解释“光栅”对介质饱和程度的影响

进而造成的驻波光强的相应增减的一种借用方法,而并不存在实际上的后向散射光。

弄清了增益介质的饱和光栅的实质后,我们便可以用相似的方法进一步讨论对撞锁模中饱和吸收介质的瞬态饱和光栅问题。

### 三、对撞锁模中的问题

所谓瞬态光栅是指对撞锁模中两相同脉冲在饱和吸收体中对撞时,由于干涉导致光强的空间调制,进而形成的饱和吸收体粒子数空间烧孔现象,其对驻波光场的作用,可以直观地视为一种瞬态的吸收饱和光栅。

为了数学处理方便,我们将饱和吸收体吸收几率随光强增加的下降按快响应处理,并认为吸收恢复时间比脉宽大得多,即假定吸收几率一经减小在整个脉冲通过过程中便不再恢复,同时由于脉冲很短,所以忽略掉光强作用于饱和吸收体的按时间累积的效应。这样,可得到比较简单的饱和吸收体吸收系数表达式

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s} \quad (10)$$

式中  $\alpha_0$  为小信号吸收系数,  $I_s$  为饱和吸收体的饱和光强,  $I$  为已通过的最大光强。

在对撞锁模中,设两脉冲全同,且强度是关于峰值对称的,并设光脉冲沿  $z$  轴传播,对撞中心处  $z$  坐标为 0,则可用下式描述其电场

$$E(z, t) = E_0 \left[ G^{\frac{1}{2}} \left( t - \frac{z+z_0}{v} \right) e^{-i[\nu t - k(z+z_0)]} + G^{\frac{1}{2}} \left( t - \frac{z-z_0}{v} \right) e^{-i[\nu t + k(z-z_0)]} \right] \quad (11)$$

两脉冲完全重叠时光强可表示为

$$I = I_0 \sin^2(kz) G(z) \quad (12)$$

其中  $G$  为与脉冲形状有关的函数。令归一化光强  $\dot{i} = I/I_s$ , 并认为两脉冲对撞重合时,在饱和吸收体层中,  $G(z)$  在  $z$  方向上的变化对我们的问题来说可略,则驻波光强可表示为

$$\dot{i} = \dot{i}_0 \sin^2(kz) \quad (13)$$

其中

$$\dot{i}_0 = I_0 G(0)/I_s$$

因此,可将(10)式改写成如下形式:

$$\alpha = \alpha_0 / (1 + \dot{i}_0 \sin^2(kz)) \quad (14)$$

展开取到一次项有

$$\alpha = \alpha_0 [1 - \dot{i}_0 \sin^2(kz)] \quad (15)$$

此时饱和吸收体对光功率的吸收可表示为

$$\dot{i}_c = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \dot{i}_0 \sin^2(kz) \alpha_0 [1 - \dot{i}_0 \sin^2(kz)] dz \quad (16)$$

其中  $d$  为饱和吸收体厚度,积分后得

$$\dot{i}_c = \dot{i}_0 \alpha_0 \frac{d}{2} \left( 1 - \frac{3}{4} \dot{i}_0 \right) \quad (17)$$

显然,上式中第二项  $3/4$  中的  $1/4$  是由光栅提供的。由此可见,由于瞬态饱和光栅的作用,饱和吸收体对脉冲峰值附近对撞形成的驻波光场的吸收减小了,换句话说就是减少了脉冲峰值损耗,其物理机制与上一节所讨论的情况类似。

以上讨论的仅是脉冲峰值附近处通过饱和吸收体的情况,而脉冲前沿、后沿通过饱和吸收体时,有着完全不同的情况。此时,脉冲不重叠或重叠很少,干涉产生的驻波效应可略,两脉冲可分别表示为

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 G\left(t - \frac{z+z_0}{V}\right) \quad (18)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} I_0 G\left(t + \frac{z-z_0}{V}\right) \quad (19)$$

脉冲前沿进入染料时,饱和吸收体空间粒子数烧孔尚未出现。若假定前沿光强甚小,在整个前沿通过时饱和吸收体系数的改变可略,并用  $I_E$  表示脉冲前沿任意小段的平均光强,  $I_{E0}$  为该小段的入射光强,则有

$$\frac{dI_E}{dz} = -\alpha_0 I_E \quad (20)$$

此小段的透射光强可解得为

$$I_{E1} = I_{E0} e^{-\alpha_0 d} \quad (21)$$

一阶展开可得归一化吸收光强  $\hat{v}_c = (I_{E0} - I_{E1})/I_s$  为

$$\hat{v}_c = \hat{v}_0 \alpha_0 d \quad (22)$$

与(17)式相比可见,前沿比峰值附近处有较大损耗,从而可以获得有效的压缩。另外,注意到此时瞬态光栅实际上尚未形成,因此,前沿的吸收情况与被动锁模中的情形是基本相同的。

后沿通过时,与前沿不同的是,粒子数烧孔已经形成,(20)式应改写为

$$dI_E/dz = -\alpha_0 \sin^2(kz) I_E \quad (23)$$

解得

$$I_{E1} = I_{E0} e^{-\frac{1}{2}\alpha_0 d} \quad (24)$$

和

$$\hat{v}_c = \hat{v}_0 \alpha_0 \cdot d/2 \quad (25)$$

上式的结果似乎并不令人满意,饱和吸收体对脉冲后沿的吸收能力仅为对前沿的 1/2。但应注意,在脉冲宽度小于饱和吸收体恢复时间的情况下,如无对撞造成驻波场,则在脉冲峰值过后,饱和吸收体将被整体漂白,其结果是使脉冲后沿无损通过。这里,对撞形成驻波的结果,保留了波节处介质的高吸收率,后沿不能无损通过,因而大大提高了饱和吸收体对脉冲后沿的压缩。

综合考虑(17)、(22)、(25)三式,可见,在脉冲通过饱和吸收体的全过程中,以前沿吸收最为强烈,后沿吸收次之,而峰值附近吸收最小。峰值损耗较小,前后沿被强烈吸收,所以,它将产生出更短的脉冲。此外,与一般的被动锁模相比,对撞锁模的前沿吸收部分相似,但引进了后沿压缩的机制,同时减少了峰值部分的损耗。这些过程将大大提高饱和吸收体对脉冲的压缩效率。

#### 四、讨 论

在对撞锁模过程中,原来意义上的瞬态饱和光栅实际上仅存在于脉冲重叠较好的时候,其作用等效于产生与反向行驶的脉冲同相位的后向散射以减小峰值附近的损耗。而后沿的压缩并不是由于瞬态光栅的后向散射造成的,实际上正好相反,是由于瞬态光栅作用的消失——在

驻波效应减弱后, 对应原波节处保存下来的高吸收率饱和吸收介质将对后沿有一定的吸收作用。

总而言之, 瞬态饱和光栅现象确实存在于对撞锁模过程中, 但是不能单一地应用这一概念来解释饱和吸收体内脉冲压缩作用增强的全过程。只有全面考虑饱和吸收体空间粒子数烧孔的形成, 与两脉冲干涉驻波场的产生、加强、减弱和消失的关系, 及其相互作用的全过程, 才能找到对撞锁模中饱和吸收体脉冲压缩效率得到提高的真正物理机制, 弄清瞬态饱和光栅现象在此过程中的应有地位。

本文完成过程中得到北京大学无线电系程和平同志多方面的帮助, 特此致谢。

### 参 考 文 献

- 1 R. Fork, *Appl. Phys. Lett.*, **38**(9), 671(1981)
- 2 M. Sargent III, *Appl. Phys.*, **9**, 127(1976)

---

## 中国光学行业协会激光专业协会在京成立

中国光学行业协会激光专业协会成立大会于 1989 年 10 月 17 日至 19 日在北京举行。

会议期间, 代表们听取了有关激光专业协会的筹备情况汇报及“八·五”激光技术发展规划起草小组有关规划(草稿)的说明, 还听取了有关医用激光、激光检测、激光加工、固体激光技术、光盘存储技术、军用激光产业现状与发展的报告。与会代表认真讨论、修改并一致通过了中国光学行业协会激光专业的协会章程(草案)。

大会通过认真酝酿讨论, 采用无记名投票方式选举了协会的首届理事会。

代表们希望协会在近期能作好如下几件工作: (1) 对 1988 年、1989 年全国激光产品、产值进行调查, 并向政府部门及会员单位报送; (2) 继续订好“八·五”激光技术发展规划; (3) 积极参与并组织本行业产品质量的评比活动; (4) 参加中国光学行业协会组织的产品展览展销、积极开拓激光产品的国内外市场; (5) 在技术经济政策及标准制订中选择若干项目起步, 积极协助政府组织落实; (6) 搞好组织建设, 不断吸收新的会员单位, 壮大协会队伍。

(木旦)