

# 一种新型非线性反射镜设计的理论分析\*

吕振国 李庆行 余振新

(中山大学激光与光谱学研究所, 广州)

**摘要:** 该文对一种新型非线性反射镜的设计进行了理论研究, 结果表明把该非线性反射镜置于激光腔内便能起到被动锁模作用, 文中也给出了它的最佳设计的参数选择。

## Theoretical analysis of a novel nonlinear mirror device

Lu Zhenguo, Li Qingxing, Yu Zhenxin

(Institute of Laser and Spectroscopy, Zhongshan University)

**Abstract:** Theoretical study of a novel nonlinear mirror device is presented in this paper. The results indicate that laser will tend to become passively modelocked when the novel nonlinear mirror is used in the laser cavity. Parameter selection of the optimal design for the device has also been given in this paper.

### 一、引 言

反射率随光强变化的非线性反射镜已被人们应用于各种技术中。例如, 用饱和吸收染料池和一块反射镜构成的反射率随入射光强大小而变化的非线性反射镜, 就被广泛用在调Q和锁模激光技术中, 但由于饱和吸收染料易被光解, 致使这种非线性反射镜耐用性差、且输出脉宽受所采用的饱和吸收染料恢复时间的限制等缺点。为了满足各种技术上的需要, 人们迄今仍在不断地探索新的非线性反射镜。

最近, 人们把一块非线性倍频晶体NLC和一块对基频光FW和倍频光SH有不同反射率的反射镜M相结合, 适当地调节晶体NLC和反射镜M之间的距离 $D$ , 就能构成一个反射率随光强的增大而增大的非线性反射镜, 把这种非线性反射镜置于激光腔内便能起被动锁模的作

\* 国家自然科学基金资助课题。

[9] Marshall J. Thermal and mechanical mechanisms in laser damage to the retina. Invest Ophthalmol, 1970; 9 (2); 97

[10] 徐碣敏, 周淑英, 钱焕文 *et al.* 脉冲红宝石激光的眼损伤作用. 眼外伤职业眼病杂志, 1987; 9 (3); 139

收稿日期: 1991年5月28日。

用<sup>[1,2,3]</sup>。它与饱和吸收锁模染料相比,具有响应时间快、元件耐用和适用光谱范围广等优点。文献[4]是在能量守恒前提下,采用一些简单的数学变换,对这种新型锁模技术中的非线性反射镜进行了一些理论分析,但在其分析推导过程中,各参量的物理思想是不太明确和充分的;例如,该文对基频光FW和倍频光SH的相位匹配角、它们之间在空气中传输时由于色散而造成的相位差以及非线性晶体NLC离输出腔镜的距离等参量对这种锁模技术的影响都没有给出明确和恰当的解释。为了弥补文献[4]理论分析过程中的不足,本文试图从另一角度来对此作出分析和讨论。

本文是在一些合理假设前提下,从两种光波之间相互作用的耦合波方程开始,循环渐进地对该非线性反射镜的作用机理进行了详细的理论分析,得到了比文献[4]更为严格和准确的非线性反射率 $R_{NL}$ 随入射光强变化的关系式,文中还对这种非线性反射镜的最佳设计的参数选择进行了讨论分析。

## 二、工 作 原 理

非线性反射镜如图1所示。当一束频率为 $\omega$ 的基频光FW自左向右入射到非线性倍频晶体NLC中时,在满足位相匹配条件下,将产生频率为 $2\omega$ 的倍频光SH。二向色性反射镜M对基频光FW和倍频光SH的反射率分别为 $R_\omega$ 和 $R_{2\omega}$ 。对于图1所示的非线性反射镜,可利用空气色散效应<sup>[5]</sup>,通过调节NLC和镜M之间的距离 $D$ ,使其被镜M反射后的基频光FW和倍频光SH在NLC的右侧面上有合适的位相差,当它们一起入射在NLC中时,将会有部分SH能量转变成FW的能量,并且SH越强,转变成FW的光能量就越多。由此可见,一束频率为 $\omega$ 的基频光FW入射到这种新型的非线性反射镜上时,其反射率将随入射基频光FW光强的增大而增大。

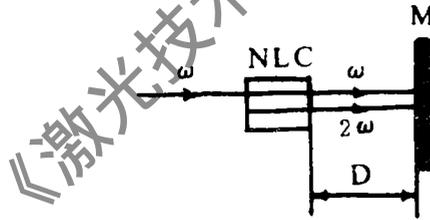


图1 非线性反射镜

NLC—非线性倍频晶体 M—二向色性反射镜(对二次谐波SH全反,对基波FW部分反)

## 三、理 论 推 导

假如想使这种组合反射镜的非线性效应明显,就应使基频光FW和二次谐波SH在NLC中的相互作用最强。而对于在NLC中具有高转换效率的相互作用光波来说,一般可认为满足下面条件:(a)耦合波是共线相位匹配的,即 $\Delta k = 2k_\omega - k_{2\omega} = 0$ 。(b)介质几乎无损耗。当慢变振幅近似成立时,NLC中的基波FW和二次谐波SH的耦合波方程可写成如下形式<sup>[6]</sup>:

$$\frac{d\varepsilon_{2\omega}(Z)}{dZ} = \frac{\omega d_c}{cn_\omega} \varepsilon_\omega^2(Z) \sin\theta \quad (1)$$

$$\frac{d\varepsilon_\omega(Z)}{dZ} = -\frac{\omega d_c}{cn_\omega} \varepsilon_{2\omega}(Z) \varepsilon_\omega(Z) \sin\theta \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dZ} = \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \cdot \frac{d}{dZ} \left[ \varepsilon_\omega^2(Z) \varepsilon_{2\omega}(Z) \right] \quad (3)$$

式中, $\theta = 2\varphi_\omega(Z) - \varphi_{2\omega}(Z)$ ;  $\varepsilon_\omega(Z)$ 和 $\varepsilon_{2\omega}(Z)$ 分别为基频光FW和倍频光SH的场强振幅; $d_c$ 为NLC的有效非线性系数; $c$ 为光速; $n$ 为折射率。下面分三种情形分析和求解该非线性反射镜

特性。

(1) 光波在晶体NLC中从左向右传播时, 基波FW和谐波SH的光场变化情况(如图2所示)。不妨引入下列变换:

$$u_{\omega} = \frac{\varepsilon_{\omega}(Z)}{\left[ \varepsilon_{\omega}^2(0) + \varepsilon_{2\omega}^2(0) \right]^{1/2}} \quad (4)$$

$$u_{2\omega} = \frac{\varepsilon_{2\omega}(Z)}{\left[ \varepsilon_{\omega}^2(0) + \varepsilon_{2\omega}^2(0) \right]^{1/2}} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{\omega d_e}{cn_{\omega}} \left[ \varepsilon_{\omega}^2(0) + \varepsilon_{2\omega}^2(0) \right]^{1/2} \cdot Z \quad (6)$$

将(4)、(5)和(6)式代入(1)、(2)和(3)式可得:

$$\frac{du_{\omega}}{d\xi} = -u_{\omega} u_{2\omega} \sin\theta \quad (7)$$

$$\frac{du_{2\omega}}{d\xi} = u_{\omega}^2 \sin\theta \quad (8)$$

$$\frac{d\theta}{d\xi} = \frac{\cos\theta}{\sin\theta} \cdot \frac{d}{d\xi} \ln \left[ u_{\omega}^2 u_{2\omega} \right] \quad (9)$$

根据能量守恒定则, 有:

$$u_{\omega}^2 + u_{2\omega}^2 = 1 \quad (10)$$

由边界条件 $\varepsilon_{2\omega}(Z=0) = 0$ , 可得 $\sin\theta = \pm 1$ 。再从图2和(8)式可知, 仅 $\sin\theta = 1$ 满足要求。

所以应取 $\theta = 2\varphi_{\omega}(0) - \varphi_{2\omega}(0) = 2m\pi + \frac{\pi}{2}$  ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), 则由(7)式~(10)式可得:

$$u_{2\omega} = \tanh(\xi + \xi_0) \quad (11)$$

$$u_{\omega} = \operatorname{sech}(\xi + \xi_0) \quad (12)$$

由边界条件 $\varepsilon_{2\omega}(Z=0) = 0$  可得 $\xi_0 = 0$ 。则由(4)式和(5)式可得:

$$\varepsilon_{\omega}(Z) = \varepsilon_{\omega}(0) \operatorname{sech}\xi \quad (13)$$

$$\varepsilon_{2\omega}(Z) = \varepsilon_{\omega}(0) \tanh\xi \quad (14)$$

最后可求出基波FW和谐波SH在晶体NLC的右侧 $Z=l$ 处的光场场强振幅为:

$$\varepsilon_{\omega}(l) = \varepsilon_{\omega}(0) \operatorname{sech} \left[ \frac{\omega d_e}{cn_{\omega}} \varepsilon_{\omega}(0) l \right] \quad (15)$$

$$\varepsilon_{2\omega}(l) = \varepsilon_{\omega}(0) \tanh \left[ \frac{\omega d_e}{cn_{\omega}} \varepsilon_{\omega}(0) l \right] \quad (16)$$

设光线从NLC的左边向右边传播过程中, 基波FW转换成谐波SH的效率为 $\eta$ , 则有:

$$\eta = \frac{\varepsilon_{2\omega}^2(l)}{\varepsilon_{\omega}^2(0)} = \tanh^2 \left[ \frac{\omega d_e}{cn_{\omega}} \varepsilon_{\omega}(0) l \right] \quad (17)$$

(2) 光波从NLC右侧开始向右传播, 经二向色性镜M反射后, 重新返回到NLC右侧 $Z=l$ 处的光场场强振幅分别为:

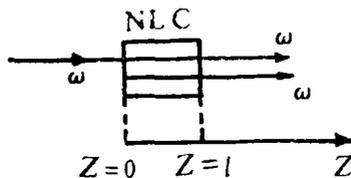


图2 基波FW和谐波SH的光场变化

$$\varepsilon_{\omega}'(l) = \sqrt{R_{\omega}} \varepsilon_{\omega}(l) = \sqrt{R_{\omega}} \varepsilon_{\omega}(0) \operatorname{sech} \left[ \frac{\omega d_e}{c n_{\omega}} \varepsilon_{\omega}(0) l \right] \quad (18)$$

$$\varepsilon_{2\omega}'(l) = \sqrt{R_{2\omega}} \varepsilon_{2\omega}(l) = \sqrt{R_{2\omega}} \varepsilon_{2\omega}(0) \tanh \left[ \frac{\omega d_e}{c n_{\omega}} \varepsilon_{\omega}(0) l \right] \quad (19)$$

(3) 光波在NLC从右向左传播时的光场变化情况,不妨重新取坐标(如图3),则有:

$$\varepsilon_{\omega}''(Z''=0) = \varepsilon_{\omega}'(Z=l) \quad (20)$$

$$\varepsilon_{2\omega}''(Z''=0) = \varepsilon_{2\omega}'(Z=l) \quad (21)$$

引入和第1种情形类似的变换,则可得:

$$\frac{du_{\omega}''}{d\xi''} = -u_{\omega}'' u_{2\omega}'' \sin\theta \quad (22)$$

$$\frac{du_{2\omega}''}{d\xi''} = u_{\omega}''^2 \sin\theta \quad (23)$$

$$\frac{d\theta}{d\xi''} = \frac{\cos\theta}{\sin\theta} = \frac{d}{d\xi''} \ln \left[ u_{\omega}''^2 u_{2\omega}'' \right] \quad (24)$$

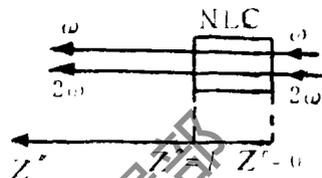


图3 光波在NLC中从右向左传播时的光场变化

由前面工作原理知道,要想使这种新型非线性反射镜起到锁模作用,则在这个传播过程中,必须有部分倍频光SH能量转变成成为基频光FW的能量,即要求

$$\frac{du_{\omega}''}{d\xi''} > 0 \text{ 或 } \frac{du_{2\omega}''}{d\xi''} < 0, \text{ 所以有: } (2m+1)\pi < \theta < 2(m+1)\pi \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

很明显,我们可以利用空气色散效应,通过调节晶体NLC和镜M之间的距离D,使

$$\theta = 2\varphi_{\omega}''(Z''=0) - \varphi_{2\omega}''(Z''=0) = 2m\pi + \frac{3\pi}{2} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots). \text{ 则此时该非线性反}$$

射镜的非线性效果最好。这时求解(22)、(23)和(24)式可得:

$$u_{2\omega}'' = \tanh(-\xi'' + \xi_0'') \quad (25)$$

$$u_{\omega}'' = \operatorname{sech}(-\xi'' + \xi_0'') \quad (26)$$

则有:

$$\varepsilon_{2\omega}''(Z'') = [\varepsilon_{\omega}''^2(0) + \varepsilon_{2\omega}''^2(0)]^{1/2} \tanh(-\xi'' + \xi_0'') \quad (27)$$

$$\varepsilon_{\omega}''(Z'') = [\varepsilon_{\omega}''^2(0) + \varepsilon_{2\omega}''^2(0)]^{1/2} \operatorname{sech}(-\xi'' + \xi_0'') \quad (28)$$

利用边界条件:  $\varepsilon_{\omega}''(Z''=0) = \varepsilon_{\omega}'(Z=l)$  和(17)式可得:

$$\xi_0'' = \operatorname{arc} \operatorname{sech} \left\{ \frac{[R_{\omega}(1-\eta)]^{1/2}}{[(1-\eta)R_{\omega} + \eta R_{2\omega}]^{1/2}} \right\} \quad (29)$$

则可求出在晶体NLC左侧  $Z''=l$  处基频光FW的光场场强振幅为:

$$\varepsilon_{\omega}''(Z''=l) = [(1-\eta)R_{\omega} + \eta R_{2\omega}]^{1/2} \varepsilon_{\omega}(0) \operatorname{sech} \left\{ \operatorname{arc} \operatorname{sech} \left[ \frac{[(1-\eta)R_{\omega}]^{1/2}}{[(1-\eta)R_{\omega} + \eta R_{2\omega}]^{1/2}} \right] \right. \\ \left. - [(1-\eta)R_{\omega} + \eta R_{2\omega}]^{1/2} \operatorname{arctanh} \sqrt{\eta} \right\} \quad (30)$$

最后可得到这种新型非线性反射镜对基频光FW的非线性反射率  $R_{NL}$  为:

$$R_{NL} = \frac{\varepsilon_{\omega}''^2(Z''=l)}{\varepsilon_{\omega}''^2(Z''=0)} = M \operatorname{sech} \left\{ \operatorname{arc} \operatorname{sech} \left[ \frac{[(1-\eta)R_{\omega}]^{1/2}}{M} \right] \right. \\ \left. - M \operatorname{arctanh} \sqrt{\eta} \right\} \quad (31)$$

式中,  $M = [(1 - \eta)R_o + \eta R_{2o}]^{1/2}$ 。由(31)式知道, 该非线性反射镜的反射率 $R_{NL}$ 是由 $R_o$ 、 $R_{2o}$ 和图2中的 $e_o(0)$ 以及倍频晶体NLC决定。

#### 四、分析和讨论

根据该非线性反射镜的工作原理知道, 只有当 $-\frac{du_o''}{d\xi''} > 0$ 或 $\frac{du_{2o}''}{d\xi''} < 0$ 时, 该非线性反射镜才能起到锁模作用, 此时的 $\theta$ 角必须满足,  $2m\pi + \pi < \theta < 2(m+1)\pi, (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 条件。这个条件可以利用空气色散效应, 适当地调节NLC和镜M之间的距离 $D$ 来实现。为了使其非线性效应最强, 在实验中, 应把 $D$ 值调在使得 $\theta = 2m\pi + \frac{3}{2}\pi (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 位置处, 此时非线性反射率 $R_{NL}$ 的具体表达式就是(31)式, 在此前提下, 作以下分析和讨论。

在实验中, 一般取 $R_{2o} = 1, R_o < 1$ ; 对 $R_o$ 取某些固定值, 由公式(31)可作出 $R_{NL}/R_o$ 随 $\eta$ 的变化关系图(如图4)。因为在图1情形下入射到NLC中的基波FW越强, 其转换或谐波SH的效率 $\eta$ 就越大。所以由图4知道, 该非线性反射镜对基波FW的非线性反射率 $R_{NL}$ 随入射基波FW光强的增大而增大。那么, 若把这种新型非线性反射镜用在激光谐振腔中, 由于腔内每个光脉冲的两翼光强值比其中间峰值的光强小, 则对应的非线性反射系数也小, 从而导致腔内来回传播的光脉冲不断压缩, 即该非线性反射镜起到了类似于被动锁模染料的作用。关于用这种新型非线性反射镜来锁模激光器的详细动力学过程分析, 我们已在另文报导<sup>[7]</sup>。从图4还可知, 对于一定的 $R_o$ ,  $\eta$ 值越大, 该非线性反射镜的非线性效应就越强, 即腔内锁模效果就越好。所以在实验中, 在使其相位匹配条件满足时即 $\Delta k = 2k_o - k_{2o} = 0$ , 还应尽量采用非线性系数大的介质, 例如采用KTP晶体, 并且非线性晶体的长度 $l$ 不能太小, 根据具体腔, 可以算出晶体长度 $l$ 的最佳值<sup>[3]</sup>。

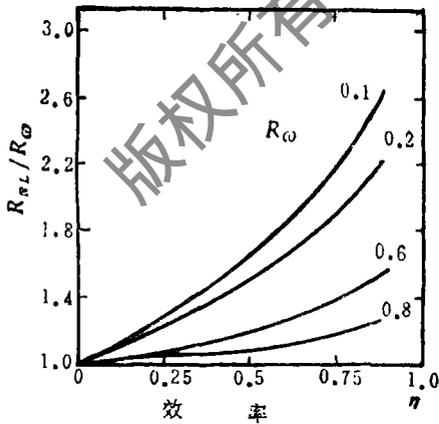


图4 当 $R_o$ 取某些值时,  $R_{NL}/R_o$ 随转换效率 $\eta$ 的变化关系( $R_{2o} = 1$ )

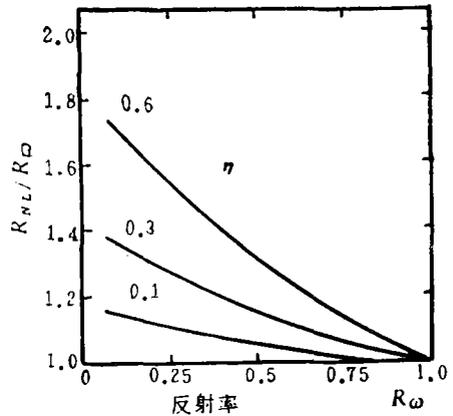


图5 当 $\eta$ 取某些值时,  $R_{NL}/R_o$ 随 $R_o$ 的变化曲线( $R_{2o} = 1$ )

图5是当 $\eta$ 取某些固定值时,  $R_{NL}/R_o$ 随 $R_o$ 的变化关系。由图5可知, 对于一定的 $\eta$ 值,  $R_o$ 值越小, 该非线性反射镜的非线性效应越明显。当然,  $R_o$ 值越小, 激光腔内损耗就越

大,所以在实际选取 $R_0$ 值时,一定要根据具体情况来考虑上述折衷关系。

很明显,该组合反射镜的非线性过程不仅仅局限于非线性倍频产生过程。它同样适用于所有可逆的非线性光学过程(如和频和差频等)。另外,它压窄激光脉宽的极限仅由在腔内传播时的群速色散决定,所以该非线性反射镜与饱和吸收锁模染料相比,具有响应时间快、元件耐用、简便和适用光谱范围广等优点。

## 五、结 论

本文报导了一种反射率随入射基频光FW的光强增大而增大的新型非线性反射镜,并对其设计思想进行了理论研究,结果表明把该非线性反射镜置于激光腔内便能起到被动锁模作用,指出该非线性反射镜可望取代传统的饱和吸收锁模染料。在文中,我们还对该模锁激光器的腔参数 $D$ 、 $R_0$ 、 $R_2$ 和非线性晶体NLC如何选择和放置作了详细的分析和讨论。最后,值得一提的是,我们用KTP晶体作为非线性倍频晶体NLC,已成功地用于锁模脉冲Nd:YAG激光器中<sup>[9]</sup>。

本所李伟良、周建英等老师参与对文中部分问题的有益讨论,在此诚致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] Stankov K A. Opt Lett, 1989; 14 (7) : 359~361
- [2] Barr J R M, Hughes D W. Appl Phys, 1986; 49B: 323~325
- [3] Carruthera T F, Duling I N. Opt Lett, 1990; 15 (14) : 804~806
- [4] Stankov K A. Appl Phys, 1988; 45B: 191~195
- [5] Yarborough J M, Falk J, Hitz C B. APL, 1971; 18 (3) : 70~73
- [6] 沈元壤. 非线性光学原理(上册). 北京: 科学出版社, 1987: 71~78
- [7] 吕振国, 李庆行, 余振新. 激光技术, 1992; 16 (1) : 50
- [8] 雅里夫 A. 光电子学导论. 北京: 科学出版社, 1983: 228~232
- [9] 吕振国, 李庆行, 余振新. 用腔内KTP倍频晶体对脉冲Nd:YAG激光器进行锁模的研究. 光学学报, 待发表

收稿日期: 1991年4月1日。 收到修改稿日期: 1991年6月15日。

· 新书介绍 ·

## 《临床实用激光医疗手册》

陈传真 韩洪富主编

四川辞书出版社出版

华西医科大学附属第一医院陈传真、韩洪富主编的《临床实用激光医疗手册》,已于1991年由四川辞书出版社出版发行。该书介绍了激光医学简史,激光的生物学效应,以及激光在临床各科的应用技术、经验、成果、进展和动态。内容简明、实用,既是激光临床治疗专业人员的工具书,也是其它医务人员、医学院校学生和进修医生的参考书。每本订价5.00元。需要者可去信联系。

联系人: 陈传真。地址: (610041) 四川成都华西医科大学附一院激光科。

(本刊通讯员 供稿)