中国激光
第11卷　第8期

内腔He-Ne激光器的位相各向异性与偏振特性

吕可诚　张铁群　李宝珍　姚玉兰

(南开大学物理系)

提要：较全面地报道了与位相各向异性有关的内腔He-Ne激光器振荡模偏振特性实验资料，并借助于Lamb理论对实验现象作了理论解释。

Phase anisotropy and polarization of an intra-cavity He-Ne laser

Lu Kecheng, Zhang Tieqin, Li Baozheng, Yao Yulan

(Physics Department, Nankai University)

Abstract: More experimental data of polarization are reported on the intracavity He-Ne laser. The polarization phenomena relates to the cavity anisotrropy closely. The phenomena are explained by Lamb theory.

一、引　　言

已有许多文章研究了与色散各向异性有关的内腔He-Ne激光器的偏振特性[1~5]。普遍认为，在多纵模振荡的内腔He-Ne激光器中，相邻纵模的偏振方向是相互垂直的。实际上各纵模偏振方向之间的关系并不如此简单。下面报道我们的一些实验结果。

二、实验观察

实验设备如图1所示。实验使用了不同厂家数十支激光器，腔长为150毫米至450毫米，都为基模运转。实验中观察到了各种类型的偏振现象。为了较系统地研究腔的各向异性与偏振特性的关系，设计了如图1所示的激光器，其腔长约450毫米。M_1是曲率半径为1米的凹面全反镜，与腔体封结在一起。放电管的另一端与一平面窗W封结。为了避免窗表面反射引起的反馈振荡，应使窗片两面镀增透膜，而且特别注意封结时尽量减小由于涂胶不匀而引起的腔体各向异性，保证平面窗片的引入只增加腔内损耗，而

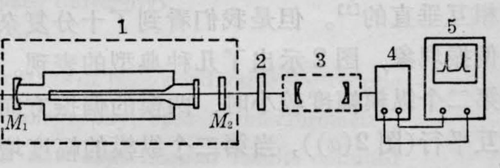


图1　实验装置

1—激光器；2—偏振片；3—球面扫描干涉仪；4—光电接收器；5—示波器

收稿日期 1983年10月5日。

仍保持内腔激光器的基本特征。M_2为平面输出镜，它与放电管分离，被架在一精密调节架上。用于研究的输出镜选自不同的生产单位，有硬膜型和软膜型两种。调节M_2，可使激光腔有不同的损耗，实现两模、三模、四模振荡。

实验中采用对腔镜M_2施加机械压力的办法，使之产生较大的双折射，在这种情况下，振荡模的偏振特性将主要由腔镜的双折射大小决定，介质的各向异性可忽略不计。

1. 偏振现象

实验表明，内腔多纵模（基模）He–Ne激光器的偏振特性十分复杂，它由腔的各向异性和模之间的耦合程度决定。在某些特殊情况下，相互垂直的两个偏振成分同时存在于同一纵模之中（如图2(c)），这时可测得两成分的差拍，其频率为几百千赫至兆赫量级。当腔镜的双折射足够大时，内腔激光器输出单一的线偏振光。以下列举一些典型的偏振特性的表现。

(1) 两模运转

国外一些作者一致认为，在双纵模振荡的内腔He–Ne激光器中，两模的偏振方向是相互垂直的[1]。但是我们看到了十分复杂的偏振现象，图2示出了几种典型的表现。当第二个纵模幅度较小时，两模的偏振方向相互平行（图2(a)），当第二个纵模的幅度增至

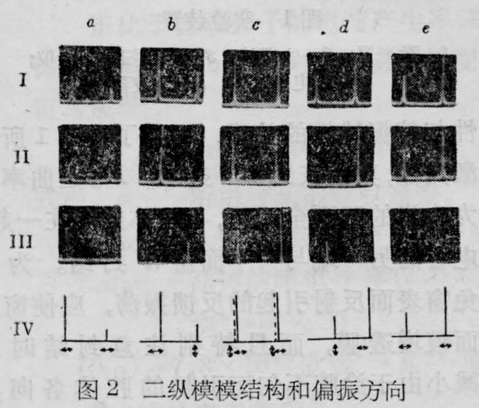


图2　二纵模模结构和偏振方向

I—表示全强度；　II、III—表示水平方向偏振和垂直方向偏振的强度：IV—偏振方向的结构图；a、b、c、d、e表示不同的偏振结构

某一强度时（该强度的大小与腔镜的双折射大小有关），它的偏振方向突然改变$\frac{\pi}{2}$，形成两模相互垂直的偏振状态。当两模相对于中心线为对称时，容易出现每个纵模内两种偏振成分都出现的情况。第二个纵模的强度大于第一个纵模时，两模的偏振方向交换，这种变化过程是突然的（图2(d)）。

(2) 三纵模振荡

随着腔镜双折射的增加，三纵模振荡时有如图3所示的几种典型情况。当各向异性较大时，两较强的模的偏振方向平行，第三个较小的纵模与之垂直（图3(d)）。而国外一些作者报道最大的纵模与最小的纵模有平行的偏振方向，另一个与之垂直。

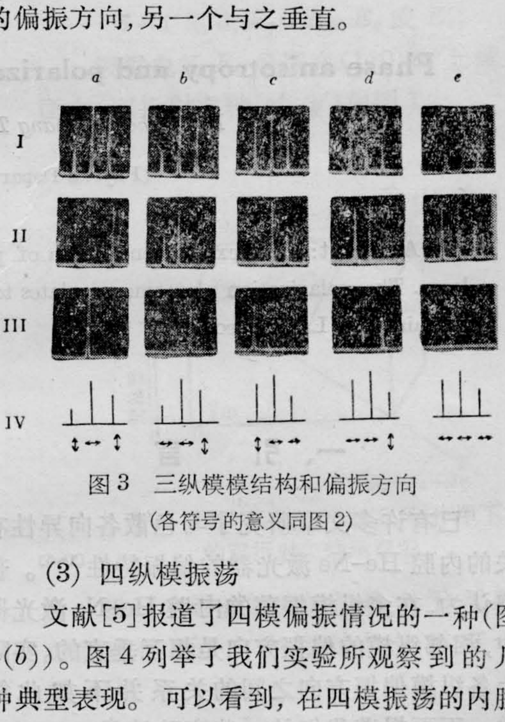


图3　三纵模模结构和偏振方向

（各符号的意义同图2）

(3) 四纵模振荡

文献[5]报道了四模偏振情况的一种（图4(b)）。图4列举了我们实验所观察到的几种典型表现。可以看到，在四模振荡的内腔激光器中，由于腔的各向异性的变化，各纵模偏振方向之间的关系是十分复杂的。

(4) 当腔的各向异性足够大时，不论两纵模、三纵模或四纵模振荡均可获得单一的线偏振输出。正象图2(e)、图3(e)和图4(e)所示的那样，振荡模数越多，功率越强，为实现单一线偏振光所需要的各向异性就越大。实验还表明，输出光的偏振方向总是沿着腔

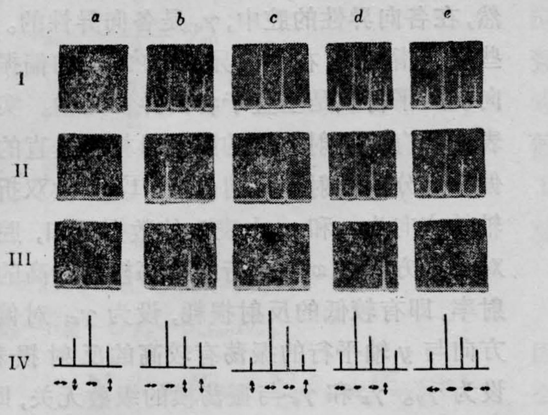


图 4　四纵模模结构和偏振方向
(各符号的意义同图 2)

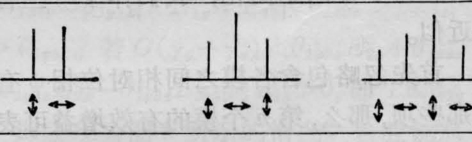
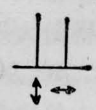
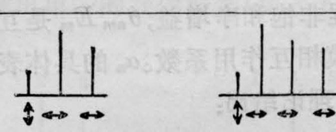
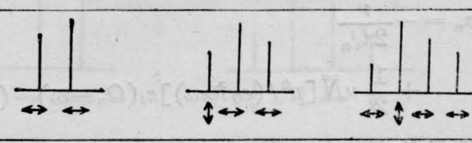
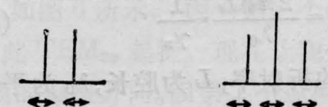
镜的低损耗轴。另外，两腔镜的低损耗轴不重合时，输出光的偏振度较差，旋转一腔镜，可使偏振度变化。

2. 腔镜各向异性的测量结果

实验表明振荡模的偏振特性不仅与腔镜的双折射大小有关，而且与激光腔的其他参数(主要是与模耦合有关的参数)有关，因此就很难确定腔镜的双折射与偏振方向之间的定量关系。但是通过测量腔镜的双折射可以揭示腔的位相各向异性与偏振特性之间的联系。

测量是用 DF 透反仪进行的，仪器所用光源为 6328 Å 的线偏振激光器。测量具有不同双折射介质镜时，首先测出当入射光的偏振方向平行于加应力的方向时介质镜的反射率，记为 R_x，再将介质镜旋转 90°，测出入射光的偏振方向与加应力方向垂直时的介质镜的反射率，记为 R_y，测量结果列于表 1。用这样的介质镜作为图 1 所示的激光器的输出镜 M_2 时，激光器的振荡模偏振情况也一同列入表内。

表 1　腔镜的反射率与模偏振特性

介质镜编号	膜　型	R_x	R_y	模　偏　振　特　性
1	硬　膜	98.86	98.82	
2	软　膜	96.55	96.52	
3	硬　模	98.80	98.49	
4	硬　模	98.58	98.30	
5	软　模	98.29	97.85	
6	软　模	97.11	96.98	

三、理论解释

要解释多纵模激光振荡中复杂的偏振特性，必须考虑激光腔的各向异性和振荡模的竞争效应。由于腔的各向异性的存在，每个纵模则可能分裂为偏振方向相互垂直的两个偏振成分。它们的差频与腔的各向异性大小成正比，对此已有许多作者从不同的角度进行了理论推导，得到了差频表达式[6]。但对多纵模振荡情况下各模偏振方向的复杂关系尚无深入研究。

由于Lamb理论[7]忽略了腔的各向异性，因此，所得到的关于振幅和频率的方程中，不能反映出振荡模的偏振特性。要想解释各向异性较强的谐振腔振荡模式偏振的复杂变化，应当在Lamb理论的基础上，把腔的各向异性损耗加在振幅和频率所满足的微分方程中，进行严格的求解。诚然，这是相当困难的。为了使问题简化，我们作了一些合理的近似。

首先忽略包含各模之间相对位相ψ有关的那些项，那么，第n个模的有效增益可表示为

$$\alpha'_n=\alpha_n-\sum_m \theta_{nm}E_m^2 \tag{1}$$

式中α_n为单程非饱和净增益，$\theta_{nm}E_m$是互饱和项，θ_{nm}是模相互作用系数。α_n的具体表达式已由Lamb理论给出：

$$\alpha_n=-\frac{\nu}{2Q_n}+\frac{1}{2}\nu\bar{N}[p^2/(\epsilon_0\hbar\varkappa u)]z_i(\Omega_n-\omega) \tag{2}$$

各符号的意义与文献[7]相同。为使方程(1)能反映腔的各向异性，对Q_n进行具体分析。根据Q值的定义，可写

$$Q_n=\frac{2\pi nL}{\lambda_0}\cdot\frac{1}{\gamma_n} \tag{3}$$

式中n为介质的折射率，L为腔长，λ_0为平均波长，γ_n为第n个纵模的单程损耗因子。显然，在各向异性的腔中，γ_n是各向异性的。一些研究指出[5]，在各向异性腔内，模的偏振方向或是平行或是垂直于各向异性光轴。实验表明，有双折射效应的腔镜对相互垂直的两偏振成分的反射率不同(见表1)。设双折射轴的方向为x和y，由表1的数据可知，腔镜对偏振方向与x轴平行的振荡模有较高的反射率，即有较低的反射损耗，设为γ_x；对偏振方向与y轴平行的振荡有较高的反射损耗，设为γ_y。γ_x和γ_y与振荡模的级数无关，即

$$\gamma'_{nx}=\gamma'_{mx}\equiv\gamma_x;\quad \gamma'_{ny}=\gamma'_{my}\equiv\gamma_y$$

那么，对各级纵模有

$$\gamma_x<\gamma_y \tag{4}$$

因此，第n个纵模沿x方向偏振的分量的单程损耗因子

$$\gamma_{nx}=\gamma'_{n0}+\gamma_x \tag{5a}$$

同理

$$\gamma_{ny}=\gamma'_{n0}+\gamma_y \tag{5b}$$

式中γ'_{n0}为与各向异性无关的损耗。结合(3)和(5)式，相互垂直的偏振成分的Q值分别为

$$Q_{nx}=\frac{A}{(\gamma'_{n0}+\gamma_x)} \tag{6a}$$

$$Q_{ny}=\frac{A}{(\gamma'_{n0}+\gamma_y)} \tag{6b}$$

其中，$A=\dfrac{2\pi nL}{\lambda_0}$

将(6a)和(6b)代替(2)式中的Q_n，则可得到第n个纵模平行于x轴偏振成分的单程非饱和增益为

$$\alpha_{nx}=-\frac{\nu}{2A}(\gamma'_{n0}+\gamma_x)+\frac{1}{2}\nu\bar{N}[p^2/(\epsilon_0\hbar\varkappa u)]\times z_i(\Omega_n-\omega) \tag{7}$$

假定对两相互垂直的偏振成分来说，平均激发密度$\bar{N}$近似相等，那么就可对(7)式中的各项整理得到两部分，一部分与各向异性无关，设为α_{n0}，另一部分与各向异性有关，设为$C\gamma_x$，那么，

$$\alpha_{nx}=\alpha_{n0}-C\gamma_x \tag{8a}$$

其中，$\alpha_{n0}=-\frac{\nu}{2A}\gamma'_{n0}$

$$+\frac{1}{2}\nu\bar{N}[p^2/(\epsilon_0\hbar\kappa u)]zi(\Omega_n-\omega)$$

$$C=\frac{\nu}{2A}$$

同理，$$\alpha_{ny}=\alpha_{n0}-C\gamma_y \tag{8b}$$

至此，我们可以把(1)式写为

$$\alpha'_{nx}=\alpha_{n0}-C\gamma_x-\theta_{nxny}E^2_{ny}-\sum_m^{m\neq n}\theta_{nxmx}E^2_{mx}-\sum_m^{m\neq n}\theta_{nxmy}E^2_{my} \tag{9a}$$

$$\alpha'_{ny}=\alpha_{n0}-C\gamma_y-\theta_{nynx}E^2_{nx}-\sum_m^{m\neq n}\theta_{nymx}E^2_{mx}-\sum_m^{m\neq n}\theta_{nymy}E^2_{my} \tag{9b}$$

(9a)和(9b)式分别为第 n 个纵模沿 x 方向偏振成分和沿 y 方向偏振成分的有效增益。可以看到，式中包含了腔的各向异性和模间的相互作用。原则上讲，利用(9)式则可解释所有的偏振现象。但是，因我们将同一纵模内的可能起振的两个偏振成分都看做一个独立的模，因此，当有多个纵模同时振荡时，每个模的有效增益将是比较复杂的。双纵模振荡就有四个可能的模。四个纵模振荡则有八个可能的模，那么模间相互作用项就有 7 项(见附录)，因此，具体考查 α'_{nx} 或 α'_{ny} 大于零或小于零是比较困难的。如果我们注意到以下事实，则可使问题简化：

(1) 多纵模振荡时，最强的一级纵模的偏振方向总是沿着低损耗轴(x 轴)方向的。

(2) 两纵模相对于增益线形中心对称时，其相互作用最强[4]。

(3) 两模的相互作用程度随两模的频率间隔的增加而减小[7]。

(4) 偏振方向平行的两模的相互作用比同条件下偏振方向相互垂直的两模的作用强[5]。

以下就三纵模和四纵模振荡中的偏振现象举例说明。

三模举例

若激光振荡于三个纵模，设为 1、2、3 (图 5)。因为第 2 个纵模靠近增益线形中心，振荡强度最大，它的偏振方向总是沿 x 方向的，即 $\alpha'_{2x}>0$，TEM_{2x} 起振。现在考查第 3 个纵模。假定第 1 个纵模的幅度较小，第 3 个模与第 1 个模的频率间隔较大，因此忽略第 1 个模对第 3 个模的影响，那么，根据(9)式：

$$\begin{aligned}\alpha'_{3x}&=\alpha_{30}-C\gamma_x-\theta_{3x3y}E^2_{3y}-\theta_{3x2x}E^2_{2x}\\ \alpha'_{3y}&=\alpha_{30}-C\gamma_y-\theta_{3y3x}E^2_{3x}-\theta_{3y2x}E^2_{2x}\end{aligned} \tag{10}$$

因为 $\theta_{3x3y}\approx\theta_{3y3x}$，$E_{3y}\approx E_{3x}$，$\theta_{3x2x}>\theta_{3y2x}$，那么，$\alpha'_{3x}$ 与 α'_{3y} 究竟那个较大，取决于 $C(\gamma_y-\gamma_x)$ 与 $(\theta_{3x2x}-\theta_{3y2x})E^2_{2x}$ 的大小。若 $C(\gamma_y-\gamma_x)>(\theta_{3x2x}-\theta_{3y2x})E^2_{2x}$，那么 $\alpha'_{3x}>\alpha'_{3y}$，模竞争的最后结局将使 $\alpha'_{3x}>0$。这就是说，腔镜的双折射较大时，第 3 个纵模沿 x 方向偏振的模将起振。反之亦然。

在 TEM_{2x} 和 TEM_{3x} 存在的情况下，考查第 1 个纵模。由(9)式，

$$\alpha'_{1x}=\alpha_{10}-C\gamma_x-\theta_{1x1y}E^2_{1y}-\theta_{1x2x}E^2_{2x}-\theta_{1x3x}E^2_{3x}$$

$$\alpha'_{1y}=\alpha_{10}-C\gamma_y-\theta_{1y1x}E^2_{1x}-\theta_{1y2x}E^2_{2x}-\theta_{1y3x}E^2_{3x}$$

因为 $\theta_{1x1y}\approx\theta_{1y1x}$；$E^2_{1y}\approx E^2_{1x}$；$\theta_{1x2x}>\theta_{1y2x}$；$\theta_{1x3x}>\theta_{1y3x}$。若 $C(\gamma_y-\gamma_x)<\theta_{1x2x}E^2_{2x}+\theta_{1x3x}E^2_{3x}-\theta_{1y2x}E^2_{2x}-\theta_{1y3x}E^2_{3x}$，则 $\alpha'_{1y}>0$，即 TEM_{1y} 起振，即表现为图 5 所示的情况。若腔镜双折射很大使得上面的不等式的左边大于右边，那么，$\alpha'_{1x}>0$，即 TEM_{1x} 起振，这时激光器将输出单一的线偏振光(图 3(e))。

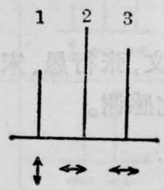


图 5

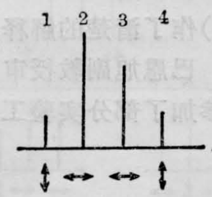


图 6

四模举例

设四个纵模振荡，它们依次被标为 1、2、3、4，如图 6 所示。因为第二个纵模强度最大，因此 TEM_{2x} 起振。现在让我们考查第 3 个纵模的偏振方向。因第 1 个纵模强度较小，且 $\Delta\nu_{13}$ 较大，故忽略第 1 个纵模对第 3 个纵

模的影响。由(9)式,可写出

$$\alpha'_{3x}=\alpha_{30}-C\gamma_x-\theta_{3x3y}E^2_{3y}-\theta_{3x2x}E^2_{2x}$$
$$-\theta_{3x4x}E^2_{4x}-\theta_{3x4y}E^2_{4y}$$
$$\alpha'_{3y}=\alpha_{30}-C\gamma_y-\theta_{3y3x}E^2_{3x}-\theta_{3y2x}E^2_{2x}$$
$$-\theta_{3y4y}E^2_{4y}-\theta_{3y4x}E^2_{4x}$$

因为 $\theta_{3x3y}\approx\theta_{3y3x},\ E^2_{3x}\approx E^2_{3y},\ \theta_{3x4x}\approx\theta_{3y4y},$
$\theta_{3x4y}\approx\theta_{3y4x},\ E^2_{4y}\approx E^2_{4x}$

因此，只要腔镜的双折射较大，以至满足 $C(\gamma_y-\gamma_x)>(\theta_{3x2x}-\theta_{3y2x})E^2_{2x}$，则可实现 $\alpha'_{3x}>0$, 即 TFM_{3x} 振荡。

在 $E_{2x}>0$、$E_{3x}>0$ 的情况下，考查第一个纵模，这时我们忽略第4个纵模对它的影响,根据(9)式,可写出

$$\alpha'_{1x}=\alpha_{10}-C\gamma_x-\theta_{1x1y}E^2_{1y}-\theta_{1x2x}E^2_{2x}-\theta_{1x3x}E^2_{3x}$$
$$\alpha'_{1y}=\alpha_{10}-C\gamma_y-\theta_{1y1x}E^2_{1x}-\theta_{1y2x}E^2_{2x}-\theta_{1y3x}E^2_{3x}$$

因为 $\theta_{1x1y}\approx\theta_{1y1x},\ E^2_{1x}\approx E^2_{1y},\ \theta_{1x2x}>\theta_{1y2x},$
$\theta_{1x3x}>\theta_{1y3x}$

因此,只要腔镜的双折射不是太大,则可能使 $\alpha'_{1y}>\alpha'_{1x}$, 即 TEM_{1y} 振荡。

在 $E_{1y}>0,\ E_{2x}>0,\ E_{3x}>0$ 的情况下，考查第4个纵模。同样，忽略第1模对它的影响,由(9)式可写出:

$$\alpha'_{4x}=\alpha_{40}-C\gamma_x-\theta_{4x4y}E^2_{4y}-\theta_{4x2x}E^2_{2x}-\theta_{4x3x}E^2_{3x}$$
$$\alpha'_{4y}=\alpha_{40}-C\gamma_y-\theta_{4y4x}E^2_{4x}-\theta_{4y2x}E^2_{2x}-\theta_{4y3x}E^2_{3x}$$

因为 $\theta_{4x4y}\approx\theta_{4y4x},\ \theta_{4x2x}>\theta_{4y2x},\ \theta_{4x3x}>\theta_{4y3x},$
因此只要腔镜的双折射不是很大，则可能实现 $\alpha'_{4y}>\alpha'_{4x}$, 即 TEM_{4y} 振荡。至此我们对图4(c)作了清楚的解释。

巴恩旭副教授审阅了全文,张行愚、宋文涛参加了部分实验工作,特此感谢。

附　录

由式(9)可写出四个纵模振荡时八个可能起振的偏振分量的有效增益为:

$$\alpha'_{1x}=\alpha_{10}-C\gamma_x-\theta_{1x1y}E^2_{1y}-\theta_{1x2x}E^2_{2x}-\theta_{1x3x}E^2_{3x}$$
$$-\theta_{1x4x}E^2_{4x}-\theta_{1x2y}E^2_{2y}-\theta_{1x3y}E^2_{3y}-\theta_{1x4y}E^2_{4y}$$
$$\alpha'_{1y}=\alpha_{10}-C\gamma_y-\theta_{1y1x}E^2_{1x}-\theta_{1y2x}E^2_{2x}-\theta_{1y3x}E^2_{3x}$$
$$-\theta_{1y4x}E^2_{4x}-\theta_{1y2y}E^2_{2y}-\theta_{1y3y}E^2_{3y}-\theta_{1y4y}E^2_{4y}$$
$$\alpha'_{2x}=\alpha_{20}-C\gamma_x-\theta_{2x2y}E^2_{2y}-\theta_{2x1x}E^2_{1x}-\theta_{2x3x}E^2_{3x}$$
$$-\theta_{2x4x}E^2_{4'}-\theta_{2x1y}E^3_{1y}-\theta_{2x3y}E^2_{3y}-\theta_{2x4z}E^2_{4y}$$
$$\alpha'_{2y}=\alpha_{20}-C\gamma_y-\theta_{2y2x}E^2_{2x}-\theta_{2y1x}E^2_{1x}-\theta_{2y3x}E^2_{3x}$$
$$-\theta_{2y4x}E^2_{4x}-\theta_{2y1y}E^2_{1y}-\theta_{2y3y}E^2_{3y}-\theta_{2y4y}E^2_{4y}$$
$$\alpha'_{3x}=\alpha_{30}-C\gamma_x-\theta_{3x3y}E^2_{3y}-\theta_{3x1x}E^2_{1x}-\theta_{3x2x}E^2_{2x}$$
$$-\theta_{3x4x}E^2_{4x}-\theta_{3x1y}E^2_{1y}-\theta_{3x2y}E^2_{2y}-\theta_{3x4y}E^2_{4y}$$
$$\alpha'_{3y}=\alpha_{30}-C\gamma_y-\theta_{3y3x}E^2_{3x}-\theta_{3y1x}E^2_{1x}-\theta_{3y2x}E^2_{2x}$$
$$-\theta_{3y4x}E^2_{4x}-\theta_{3y1y}E^2_{1y}-\theta_{3y2y}E^2_{2y}-\theta_{3y4y}E^2_{4y}$$
$$\alpha'_{4x}=\alpha_{40}-C\gamma_x-\theta_{4x4y}E^2_{4y}-\theta_{4x1x}E^2_{1x}-\theta_{4x2x}E^2_{2x}$$
$$-\theta_{4x3x}E^2_{3x}-\theta_{4x1y}E^2_{1y}-\theta_{4x2y}E^2_{2y}-\theta_{4x3y}E^2_{3y}$$
$$\alpha'_{4y}=\alpha_{40}-C\gamma_y-\theta_{4y4x}E^2_{4x}-\theta_{4y1x}E^2_{1x}-\theta_{4y2x}E^2_{2x}$$
$$-\theta_{4y3x}E^2_{3x}-\theta_{4y1y}E^2_{1y}-\theta_{4y2y}E^2_{2y}-\theta_{4y3y}E^2_{3y}$$

参 考 文 献

[1] D Lenstral; *Physica*, 1978, **95C**, 405.
[2] W. J. Tomlinson *et al.*; *Phys. Rev.*, 1967, **164**, 466.
[3] M. Sargout *et al.*; *Phys. Rev.*, 1967, **164**, 436.
[4] Esterk Hasle; *Opt. Commun.*, 1979, **31**, 206.
[5] P. N. Puntambekar *et al*; *Opt. Commun.*, 1982, **41**, No. 3, 191.
[6] R. Balhorn *et al.*; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, 2955.
[7] W. E. Lamb; *Phys. Rev.*, 1964, **134** 6A, 1429.