

文章编号: 0253-2239(2004)02-152-6

晶体的连续双折射双反射及其集成应用: $1 \times N$ 电光开关*

任海霞 刘立人 宋哲 栾竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 根据惠更斯定理,给出了单轴晶体内双折射与全内双反射的光线方向和光波法线方向的普遍公式。并讨论了在晶体内沿多个面的连续双折射双反射,分析了前一界面输出量和后一界面输入量之间的联系,得到多次双折射双反射后的光线方向和光波法线方向。在此基础上,提出一种单块晶体集成的 $1 \times N$ 电光开关,即把多个电光调制器安置在全反射面之间。由于双折射效应,寻常光和非常光有不同的全内反射;给不同的电极对上加上半波电压改变输入光的偏振状态,再使光通过不同数目的反射面反射,最后输出光就有不同的角度。具有结构简单、插入损耗小、抗干扰性强等优点。给出了 1×4 光开关的实例。

关键词: 信息光学; $1 \times N$ 电光开关; 双折射; 双反射; 连续界面; 集成
中图分类号: O435.1 文献标识码: A

Double Refraction and Reflection of Sequential Interfaces in a Crystal and Application to Integration of $1 \times N$ Optical Wwitch

Ren Haixia Liu Liren Song Zhe Luan Zhu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 26 November 2002)

Abstract: The general formulation of double refraction or internal double reflection with different directions of propagation vector and wave vector in a uniaxial crystal is analyzed in terms of the Huygens principle. Then double refraction and double reflection along the sequential interfaces in a crystal are discussed. With the relations between the output of the former interface and the input of the latter, double refraction and/or double internal reflection in a crystal along two and multiple successive interfaces can be calculated. On this basis, a configuration of electrooptic $1 \times N$ optical switch integrated in a single slab of LiNbO_3 is suggested, which consists of an array of electrooptic polarization modulators between the interfaces for total internal reflection. Due to double refraction effect, the ordinary ray and the extraordinary ray have different reflections. From different switching states of modulators, internal double reflection along the sequential interfaces of a crystal can lead to different directions of the output beam. The suggested $1 \times N$ optical switch is simple and compact in construction, low in loss and insensitive to environment. An experimental 1×4 switch is demonstrated, too.

Key words: information optics; $1 \times N$ optical switch; double refraction; double reflection; sequential interfaces; integration

* 国家自然科学基金(66177016)、上海市科委(2002CCA03500)资助课题。

E-mail: dstrait@sina.com

收稿日期: 2002-11-26

1 引 言

各向异性的单轴晶体有双折射效应^[1,2]: 当一束光从空气或在晶体内入射到晶面上时, o 光(寻常光)和 e 光(非常光)有不同的折射和全内反射方向。

o 光沿着它的波前法线方向(也就是波法线方向)传播,其折射和反射与在各向同性介质中传播一样。而 e 光的光线传播方向与波法线方向一般是不一致的。很多文献研究了单轴晶体内的双折射双反射^[3~8],对于单个面上的情况已经有了较透彻的理解。e 光的折射或全内反射不仅取决于它的光线方向也取决于它的波法线方向。但是要指出的是上面所列出的文献大多处理的是 e 光的光线方向与波法线方向一致时的入射情况。实际上,一束光入射含有多个界面的晶体后可能被反射多次才从晶体中射出。在这种情况下,双折射双反射的光线方向和波法线方向都应该考虑。所以有必要整理出光线方向与波法线方向不一致时的 e 光的双折射双反射的公式。并在此基础上,计算晶体内的连续双折射双反射。

晶体的双折射双反射效应对电光器件很有用,近年来在光通信中有了更多使用,比如 $1 \times N$ 光开关^[9~12],但它们大多用分立元件多级级联构成。本文采用双折射双反射效应分离 o 光和 e 光,结合线性电光效应旋转 o 光变成 e 光或 e 光变成 o 光的电控方法,并且通过单块晶体内部多个反射面的反射,最终实现单晶集成的 $1 \times N$ 电光开关。

2 双折射

建立如图 1 所示的 xz 坐标系, z 轴是晶体光轴的方向。 n_o 、 n_e 分别为晶体的寻常光折射率和非常光折射率,晶体的光轴在 xz 面内。在本文中我们只考虑光轴在入射面内的情况。界面与光轴夹角为 θ ,从界面逆时针转向 z 轴为正,且 $-90^\circ < \theta \leq 90^\circ$ 。上标 i 指入射, r 指折射或反射。

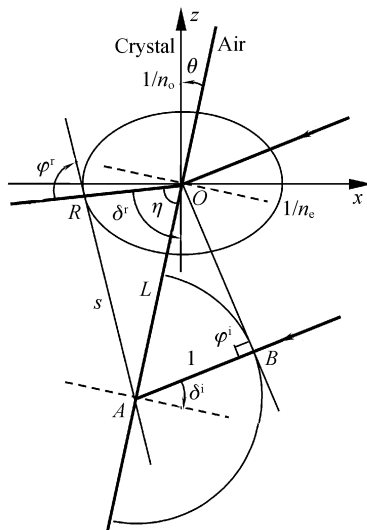


Fig. 1 Refraction from air to crystal

2.1 从空气到晶体的折射

如图 1 所示,一束平行光线从空气入射到单轴晶体表面上。 δ^i 是入射光线与界面法线之间的夹角, $-90^\circ < \delta^i \leq 90^\circ$, 以入射光线顺时针转向界面法线为正,反之为负; δ^r 是折射光线与光轴 z 之间的夹角。 ϕ^i, ϕ^r 分别是入射光线、折射光线与相应波面之间的夹角, $0^\circ < \phi^r \leq 180^\circ$ 。在图 1 中, $\theta > 0^\circ, \delta^i > 0^\circ, \phi^i = 90^\circ$ 。

根据惠更斯原理^[4],晶体内的 e 光波面是椭圆

$$n_e^2 x^2 + n_o^2 z^2 = 1, \quad (1)$$

的切面

$$n_e^2 x_R x + n_o^2 z_R z = 1, \quad (2)$$

其中 $R(x_R, z_R)$ 是切点。则 OR 方向就是折射后 e 光光线方向, AR 就是折射后 e 光波面, AR 的法线方向就是折射后光波法线方向。我们要求出 $R(x_R, z_R)$, 就可得到折射光线的方向和折射光波法线的方向。

AR 也可表示为

$$(n_e x_A)(n_e x_R) + (n_o z_A)(n_o z_R) = 1, \quad (3)$$

点 R 也满足(1)式:

$$(n_e x_R)^2 + (n_o z_R)^2 = 1, \quad (4)$$

入射到晶面上的波面 OB 被 $AB = 1$ 的距离分开, L 为 OA 的长度, s 为 AR 的长度, η 为界面和折射光线之间的夹角,从图 1 中可得

$$L = AB \sin \phi^i / \sin \delta^i = 1 / \sin \delta^i, \quad (5)$$

$$x_A = -L \sin \theta, \quad z_A = -L \cos \theta, \quad (6)$$

$$s = \sqrt{(x_A - x_R)^2 + (z_A - z_R)^2}, \quad (7)$$

$$\eta = \delta^r - \theta, \quad (8)$$

$$\delta^r = \arctan\left(\frac{x_R}{z_R}\right), \quad (9)$$

$$\phi^r = \arcsin\left(\frac{L \sin \eta}{s}\right), \quad (10)$$

联立(3)式~(10)式可解得

$$\tan \delta^r = \frac{n_o n_e \sin \theta + n_o^2 \cos \theta \cdot M}{n_o n_e \cos \theta - n_e^2 \sin \theta \cdot M}, \quad (11)$$

式中 $M = \sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta - \sin^2 \delta^i} / \sin \delta^i$ 。

$$\tan \phi^r = \frac{n_o^2 + n_e^2 \tan^2 \delta^r}{(n_o^2 - n_e^2) \tan \delta^r}, \quad (12)$$

对于其他的情况,如 $\theta < 0^\circ, \delta^i < 0^\circ$,我们只需将代数值代入公式即可。如果是 o 光只要令 $n_o = n_e$ 。所以用(11)式、(12)式就可以得到从空气到晶体折射的方向。

2.2 从晶体到空气的折射

如图 2 所示,一束平行光线在晶体内部入射到单轴晶体表面上。 δ^i 是入射光线与 z 轴之间的夹角,

$-90^\circ < \delta^i \leq 90^\circ$, 如果入射光线逆时针转向 z 轴为正, 反之为负; δ^r 是折射光线与界面法线之间的夹角。 φ^i, φ^r 分别是入射光线、折射光线与相应波面的夹角, $0^\circ < \varphi^i \leq 180^\circ$ 。在图 2 中, $\theta > 0^\circ, \delta^i > 0^\circ, \varphi^i$ 可由(12)式算出。 ξ 是入射光线与界面的夹角, 入射到晶面上的波面 OB 被 $AB = b_e$ 的距离分开。与上面解法相同,

$$\xi = 180^\circ - \varphi^i - \delta^i + \theta, \quad (13)$$

$$b_e = \frac{1}{\sqrt{(n_o \cos \delta^i)^2 + (n_e \sin \delta^i)^2}}, \quad (14)$$

$$L = b_e \sin \varphi^i / \sin \xi, \quad (15)$$

最后, 我们得到

$$\delta^r = \arcsin\left(\frac{1}{L}\right) = \arcsin\left[\frac{\sin(\varphi^i + \delta^i - \theta) \sqrt{n_o^2 \cos^2 \delta^i + n_e^2 \sin^2 \delta^i}}{\sin \varphi^i}\right], \quad (16)$$

$$\varphi^r = 90^\circ, \quad (17)$$

所以用(16)式、(17)式就可以得到从晶体到空气折射的方向。

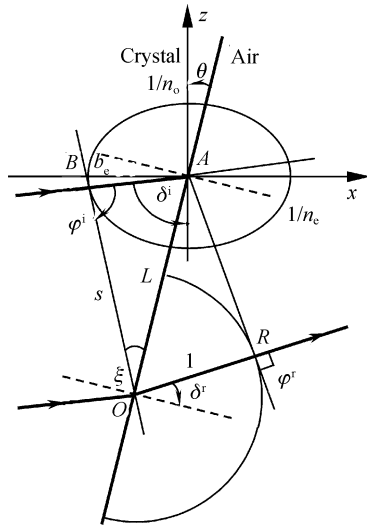


Fig. 2 Refraction from crystal to air

3 双反射

当光从晶体内向空气折射时, 如果(16)式的计算结果大于 90° , 那么就没有折射光线, 将在该界面上发生全内反射。有两种情况: 一是沿近光轴入射的反射, 另一是沿近光轴反射的反射。

3.1 沿近光轴入射的反射

如图 3 所示, 入射光沿近光轴的方向入射, δ^i 是入射光线与光轴之间的夹角, $-90^\circ < \delta^i \leq 90^\circ$, 如果入射光线逆时针转向 z 轴为正, 反之为负; δ^r 是反射光线与 x 轴之间的夹角。 φ^i, φ^r 分别是入射光线、反射光线与相应波面的夹角, $0 < \varphi^i \leq 180^\circ, 0 < \varphi^r \leq 180^\circ$ 。在图 3 中, $\theta > 0^\circ, \delta^i > 0^\circ, \varphi^i$ 可由(12)式算出。入射到晶面上的波面 OB 被 $AB = b_e$ 的距离分开。反射波面 AR 仍满足(3)式、(4)式, 与上面解法相同,

$$\xi = \varphi^i + \delta^i - \theta, \quad (18)$$

$$b_e = 1 / \sqrt{(n_o \cos \delta^i)^2 + (n_e \sin \delta^i)^2}, \quad (19)$$

$$L = b_e \sin \varphi^i / \sin \xi, \quad (20)$$

$$x_A = L \sin \theta, \quad z_A = L \cos \theta, \quad (21)$$

$$\eta = 90^\circ - \delta^r - \theta, \quad (22)$$

$$s = \sqrt{(x_A - x_R)^2 + (z_A - z_R)^2}, \quad (23)$$

$$\delta^r = \arctan(z_R / x_R), \quad (24)$$

$$\varphi^r = \arcsin(L \sin \eta / s), \quad (25)$$

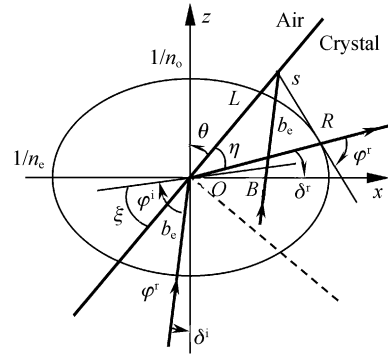


Fig. 3 Reflection in crystal from the direction near the optic axis

最终可得

$$\tan \delta^r = \frac{n_e^2}{n_o^2} \cdot \frac{-n_o^2 \sin 2\theta \cot(\varphi^i + \delta^i) + (n_o^2 \cos^2 \theta - n_e^2 \sin^2 \theta)}{n_e^2 \sin 2\theta + (n_o^2 \cos^2 \theta - n_e^2 \sin^2 \theta) \cot(\varphi^i + \delta^i)}, \quad (26)$$

$$\tan \varphi^r = \frac{n_e^2 + n_o^2 \tan^2 \delta^r}{(n_o^2 - n_e^2) \tan \delta^r}, \quad (27)$$

所以用(26)式、(27)式就可以得到从晶体内向近光轴入射的全内反射的方向。

3.2 沿近光轴反射的反射

如图 4 所示, 反射光沿近光轴的方向反射, δ^i 是

入射光线与 x 轴之间的夹角, $-90^\circ < \delta^i \leq 90^\circ$, 如果入射光线顺时针转向 x 轴为正, 反之为负; δ^r 是反射光线与 z 轴之间的夹角. φ^i, φ^r 分别是入射光线、反射光线与相应波面的夹角, $0 < \varphi^i \leq 180^\circ, 0 < \varphi^r \leq 180^\circ$.

在图 4 中, $\theta > 0^\circ, \delta^i > 0^\circ, \varphi^i$ 可由 (12) 式算出. 入射到晶面上的波面 OB 被 $AB = b_e$ 的距离分开. 与上面解法相同, 可得

$$\tan \delta^r = \frac{n_o^2}{n_e^2} \cdot \frac{n_e^2 \sin 2\theta \cot(\varphi^i - \delta^i) - (n_o^2 \cos^2 \theta - n_e^2 \sin^2 \theta)}{n_o^2 \sin 2\theta + (n_o^2 \cos^2 \theta - n_e^2 \sin^2 \theta) \cot(\varphi^i - \delta^i)}, \quad (28)$$

$$\tan \varphi^r = \frac{n_o^2 + n_e^2 \tan^2 \delta^r}{(n_o^2 - n_e^2) \tan \delta^r}, \quad (29)$$

所以用 (28) 式、(29) 式就可以得到从晶体内沿近光轴反射的全内反射的方向.

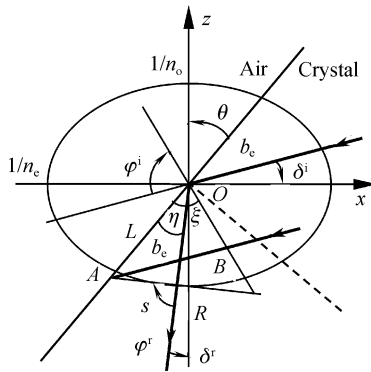


Fig. 4 Reflection in crystal to the direction near the optic axis

4 连续双折射双反射

当光进入含有多个界面的晶体元件后, 可能会被反射许多次才从晶体内出射. 我们必须考虑这种情况, 它对晶体元件的设计是很重要的. 我们用 k 来表示晶体的连续面, 比如 δ_2^i 指界面 2 的入射角.

一般来说, 两个面的双折射双反射有 7 种情况, 如表 1 所示. 为了简便, 我们用“air-crystal”表示从空气到晶体的折射, “crystal-air”表示从晶体到空气的折射, “ $\rightarrow z$ ”表示晶体近光轴入射的全内反射, “ $\uparrow z$ ”表示晶体近光轴反射的全内反射. 对于单个面上的双折射或双反射, 给出入射光的光线方向和光波法线方向, 我们都可以得到折射或反射的光线方向和光波法线方向, 问题在于如何将界面 1 的输出与界面 2 的输入联系起来. 我们知道界面 1 的出射光到了界面 2 就变成了界面 2 的入射光. 注意到在光从界面 1 传播到界面 2 的过程中, 光的波面并没有改变, 所以波面与光线之间的夹角也没有改变:

$$\varphi_1^i = \varphi_2^i. \quad (30)$$

虽然单个界面上的 δ^i 和 δ^r 的定义不尽相同, 但是在晶体近光轴都是指入射/折射/反射光线与光 z 轴或 x 轴的夹角, 对于表 1 中的第 3 和第 6 种连接情况, 有

$$\delta_2^i = 90^\circ - \delta_1^r, \quad (31)$$

对于表 1 中的其他连接情况有

$$\delta_2^i = \delta_1^i. \quad (32)$$

Table 1 Double refraction and reflection of two successive interfaces

	Interface 1	Interface 2	δ_1^i	φ_1^i	Relations	δ_2^i	φ_2^i
1	Air-crystal	Crystal-air	Eq. (11)	Eq. (12)	Eq. (30)	Eq. (16)	Eq. (17)
2	Air-crystal	$\rightarrow z$	Eq. (11)	Eq. (12)		Eq. (26)	Eq. (27)
3	Air-crystal	$\uparrow z$	Eq. (11)	Eq. (12)		Eq. (28)	Eq. (29)
4	$\rightarrow z$	$\uparrow z$	Eq. (26)	Eq. (27)	Eq. (31)	Eq. (28)	Eq. (29)
5	$\uparrow z$	$\rightarrow z$	Eq. (28)	Eq. (29)		Eq. (26)	Eq. (27)
6	$\rightarrow z$	Crystal-air	Eq. (26)	Eq. (27)		Eq. (16)	Eq. (17)
7	$\uparrow z$	Crystal-air	Eq. (28)	Eq. (29)		Eq. (16)	Eq. (17)

按照表 1 所列公式, 就可计算两个面上的双折射双反射.

多个面上的双折射双反射可以看成是几个两个面上的双折射双反射级联而成的, 而两个面上的双折射双反射由表 1 是可求解的, 因此多个面上的双折射双反射也可求解.

5 集成应用： $1 \times N$ 光开关

以前的 $1 \times N$ 光开关都是由单元器件级联而成的^[9~12], 这些单元器件包括控制入射光偏振状态的偏振器和偏转光到所需端口的双折射片. 显然, 这

种分离器件构成的光开关装配成本较高、插入损耗大、易受环境影响。在实际应用中,集成器件还是很重要的。

从第 4 部分的讨论可以看出,多个面上的双折射双反射可以看成是两个面上的双折射双反射的级联,也就是双折射片的级联。再用晶体的电光效应调制入射光的偏振状态,就能在一块晶体内集成多个电光调制器和多个双折射片,从而实现单晶集成的 $1 \times N$ 光开关。这块晶体需要 2 个折射面,一个是光束输入面,另一个是光束输出面;4 个反射面,每一个都和相邻的反射面垂直。这种几何结构使得入射的 o 偏振光在晶体内多次反射后能沿光轴经过 $N-1$ 次,在这 $N-1$ 个位置上沿光轴放置 $N-1$ 对电极对,若使用 x 切、 z 方向传播的晶片,则电场加在晶片的 y 方向上。当给 $N-1$ 对电极对中的任意一对加半波电压后,通过该电极对的光的偏振状态旋转了 90° ,即 o 光变成了 e 光,再经过不同数目的反射面反射,e 光就有了不同的传播方向,于是就有了 $N-1$ 种输出;再加上不加电压仍是 o 光输出的情况,一共有 N 种输出, $1 \times N$ 光开关就构成了。

我们给出一个 1×4 光开关的实例。如图 5 所示,是一块带有三对电极对的晶体。该晶体尺寸为 $45.0 \text{ mm} (x) \times 1.0 \text{ mm} (y) \times 50.0 \text{ mm} (z)$,有 7 个面:光束输入面 a ,第一反射面 d ,第二反射面 e ,第三反射面 g ,第四反射面 b ,光束输出面 f ,面 c 。这四个反射面两两相互垂直,光轴与入射面垂直,各个界面与光轴夹角为

$$\begin{cases} \theta_a = 90^\circ, & \theta_b = -45^\circ, & \theta_c = 0^\circ, \\ \theta_d = 45^\circ, & \theta_e = -45^\circ, & \theta_f = 0^\circ, \\ \theta_g = 45^\circ, \end{cases} \quad (33)$$

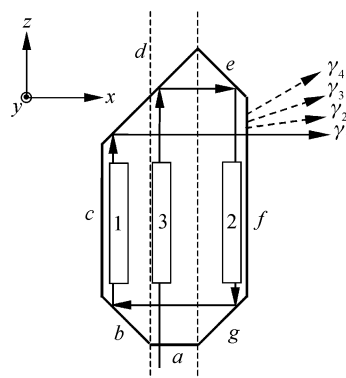


Fig. 5 Configuration of 1×4 optical switch

晶体的几何结构使得入射 o 光经过晶体光轴 3 次,相应地在上放置 3 对电极对:电极对 1 在面 b 与 d 之间,电极对 2 在面 e 与 g 之间,电极对 3 在面 a 与 d 之间。

当一束 o 光从光束输入面 a 正入射到晶体后,将被 d, e, g, b, d 这五个反射面反射,最后从光束输出面 f 折射出晶体。这几个面的连续双折射双反射可表示成表 1 中 $2 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$ 的级联形式。于是套用表 1 中的公式,就可得出最后出射光的方向。我们定义 γ 是出射角,即输出光与输出面 f 法线之间的夹角。对于 o 光, $\gamma_1 = 0^\circ$ 。当在电极对 1 上加半波电压,则入射的 o 光变成 e 光后被 1 个反射面 d 反射,从面 f 折射出晶体, $\gamma_2 > \gamma_1$ 。当在电极对 2 上加半波电压,则入射的 o 光变成 e 光后被 3 个反射面 g, b, d 反射,从面 f 折射出晶体, $\gamma_3 > \gamma_2$ 。当在电极对 3 上加半波电压,则入射的 o 光变成 e 光后被 5 个反射面 d, e, g, b, d 反射,从面 f 折射出晶体, $\gamma_4 > \gamma_3$ 。开关的转换由给不同的电极对加半波电压来控制。 1×4 光开关中各个面上的双折射双反射的数值列在表 2 中。

Table 2 Numerical values of sequential interfaces in 1×4 optical switch ($n_o = 2.2129, n_e = 2.1394$), the wavelength of input beam $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$

	No voltage		Voltage to the first electrode layers		Voltage to the second electrode layers		Voltage to the third electrode layers	
	δ^r	φ^r	δ^r	φ^r	δ^r	φ^r	δ^r	φ^r
a	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
d	0°	90°	0°	90°	0°	90°	1.87°	89.87°
e	0°	90°	0°	90°	0°	90°	4.003°	89.74°
g	0°	90°	0°	90°	1.87°	89.87°	5.61°	89.61°
b	0°	90°	0°	90°	4.003°	89.74°	8.003°	89.48°
d	0°	90°	1.87°	89.87°	5.61°	89.61°	9.36°	89.36°
f	0°	90°	4.29°	90°	12.93°	90°	21.83°	90°
γ	0°		4.29°		12.93°		21.83°	

表 2 显示的值足够区分 4 个不同的输出通道。这个例子证明了连续双折射双反射的计算公式,也证明了我们可以将多个电光调制器和双折射片集中到一块晶体上,实现 $1 \times N$ 光开关。

结论 本文给出了单轴晶体多个面上的连续双折射双反射的数学解,并在此基础上提出了一种 $1 \times N$ 光开关,它是在一块晶体内集成多个电光调制器和双折射片的单元器件。与由分离元件级联而成的 $1 \times N$ 光开关相比,这种单晶集成的光开关具有结构简单紧凑,插入损耗小,抗干扰能力强的优点。

参 考 文 献

- 1 Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Crystals*. New York: Wiley, 1984. 84~89
- 2 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. Cambridge: Pergamon Press, 1999. 799~813
- 3 Stavroudis O N. Ray tracing formulas for uniaxial crystals. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**(2):187~191
- 4 Swindell W. Extraordinary-ray and -wave tracing in uniaxial crystals. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(9):2298~2301
- 5 Simon M C, Echarri R M. Ray tracing formulas for monoaxial optical components. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(2): 354~360
- 6 Liang Quanting. Simple ray tracing formulas for uniaxial optical crystal. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(7):1008~1010
- 7 Beyerle G, McDermid I S. Ray-tracing formulas for refraction and internal reflection in uniaxial crystals. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(34):7947~7953
- 8 Avendano-Alejo M, Stavroudis O N. Huygen's principle and rays in uniaxial anisotropic media. I. Crystal axis normal to refracting surface. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2002, **19**(8):1669~1673
- 9 Gottlieb M, Ireland C L M. *Electro-Optic and Acousto-Optic Scanning and Deflection*. New York: Marcel Dekker Inc, 1984. 65~68
- 10 Wu Y, Liu L, Wang Z. Optical crossbar elements used for switching networks. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2):175~178
- 11 Wang N, Yin Y, Qiao J *et al.*. Cantor network, control algorithm, two-dimensional compact structure and its optical implementation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(7):958~962 (in Chinese)
- 12 Noguchi K. Optical free-space multichannel switches composed of liquid-crystal light-modulator arrays and birefringent crystals. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(8):1473~1481