

文章编号:1002-2082(2011)02-0323-06

一种 8 行任意扫描的电光扫描器

万玲玉, 卢智勇, 王戎承

(广西大学 物理科学与工程技术学院, 广西 南宁 530004)

摘 要:针对激光的快速智能扫描,综合利用晶体的双折射效应和电光效应,提出一种电控集成 8 行任意扫描的高速光扫描方案。主要由三级数字电光偏转器和 8×1 的周期性极化电光棱镜组构成,其中 3 个电光快门和 3 块双折射晶体构成三级数字偏转器,通过半波电压的控制实现行位置的转换,一定数目的周期性极化电光棱镜级联组成单行偏转器,通过控制电压进行单行扫描,根据电场施加方式可实现数字型或者连续型扫描。利用梯形结构的电光棱镜组设计了最大电压为 5.822 kV 时,扫描视场为 17.256° 的可通过联机控制进行任意行扫描的高速激光扫描器。

关键词:电光效应;双折射效应;电光偏转;电光扫描器

中图分类号:TN15; TP211.6

文献标志码:A

Electro-optic laser scanner for arbitrary scanning in 8 rows

WAN Ling-yu, LU Zhi-yong, WANG Rong-cheng

(College of Physical Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract:Based on intelligent laser scanning, birefringence effect and electro-optic effect, a scanner for arbitrary scanning in 8 rows is proposed. It mainly consists of a three-order electro-optic deflector and a 8×1 cascade electro-optic prism group. The three-order electro-optic deflector is composed of three electro-optic shutters and three birefringent crystal plates. The laser beams are switched between rows by controlling half-wave voltage of crystal. The prism group with cascade prisms of optic-axis reciprocatingly scans rows by applied electrical field. Digital or continuous scanning were realized by changing the properties of the applied electrical field. A laser scanner with 17.256° scanning area and 5.822KV maximal voltage was designed by using the cascade electro-optic deflector of trapezium structure. It scans arbitrarily in 8 rows using on-line operation.

Key words:electro-optic effect; birefringence effect; electro-optic deflecting; electro-optic laser scanner

引言

近年来,随着智能识别和物联网技术的发展,需要各种类型的高性能智能化光扫描器,电光扫描技术与传统的机械式光学扫描技术相比,具有扫描速度快,可控性好,体积小,重量轻,灵敏度高

无惯性等优点,逐渐成为新一代高性能光扫描技术的重要发展方向。其中基于晶体电光效应的高速光扫描一直是人们研究的热点,多种不同结构的电光扫描器被提出^[1-16]。在众多的晶体电光扫描器研究中,大多为单个偏转器的研究,而在许多

收稿日期:2010-08-11; 修回日期:2010-09-29

基金项目:国家自然科学基金(10964001)

作者简介:万玲玉(1975—),女,副教授,博士,主要从事衍射光学、晶体光学和空间光通信方面的研究。

E-mail: wanlingyu75@126.com

智能化激光扫描系统中,需要可控的高速光扫描方案。因此,本文综合利用晶体的电光效应和双折射效应,提出了一种电控集成的 8 行任意扫描的高速光扫描器。该扫描器主要由三级数字电光偏转器和 8 个级联电光棱镜偏转器构成,其中 3 个电光快门和 3 块双折射晶体组成三级数字电光偏转器,可实现 8 行的行间扫描变换,通过对 3 个电光快门的组合控制可实现任意行的扫描和变换,每个级联周期性极化电光棱镜组实现单行的扫描,根据控制电压的性质可产生数字型或者连续型的扫描。该扫描器可联机控制,具有快响应速度和扫描速度的优点,可应用于高速智能化激光扫描系统。下面介绍该扫描器的基本结构、设计原理和设计方案,最后得出结论。

1 结构设计

电控集成 8 行串扫高速光扫描器的整体结构如图 1 所示,由 3 个电光快门 1、3、5,3 块双折射晶体 2、4、6,一个半波片 7 和 8 个级联电光棱镜组构成。一个电光快门和一块双折射晶体构成一个一级数字电光偏转器,实现 2 个可控位置的偏转,将 3 级电光偏转器组合,得到 8 个可控位置的偏转,实现 8 行间的行间转换,半波片 7 的作用是调节光的偏振方向。一定数目的周期性极化电光棱镜级联构成单行电光偏转器,具体级联数目和大小根据实际需要设计,在一定范围内进行单行的光扫描,这样,8 个电光棱镜组分别进行 8 行的扫描,通过电光快门 1、3、5 和级联电光棱镜组的组合控制,实现一定角度范围的 8 行任意方式扫描。

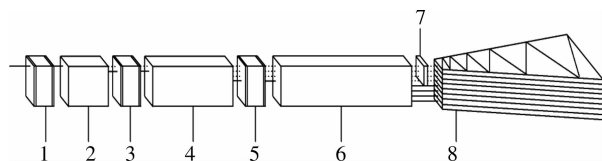


图 1 8 行可控高速光扫描器结构示意图

Fig. 1 Configuration of electro-optic laser scanner for arbitrary scanning in 8 rows 1,3,5: electro-optic shutter; 2,4,6: birefringent crystal plate; 7: half-wave plate; 8: cascaded electro-optic prisms with optic-axis reciprocating

2 设计原理

器件原理说明如下,电光快门 1 和双折射晶体 2 构成一级数字电光偏转器,使入射光为线偏振光

且其振动方向垂直双折射晶体 2 的主截面(为双折射晶体 2 的 o 光振动方向),不加电压时,入射光通过电光快门开关 1 后,振动方向不变,进入双折射晶体 2 沿 o 光方向传播,对电光开关 1 加上半波电压时,光在通过电光开关 1 后,相位延迟 π ,振动方向偏转 90° ,在双折射晶体 2 中沿 e 光方向传播,到达位置 2,如图 2 所示,其偏离 o 光方向的角度 α 为

$$\tan \alpha = (1 - n_o^2/n_e^2) \frac{\tan \varphi}{1 + (n_o^2/n_e^2) \tan^2 \varphi} \quad (1)$$

式中: φ 为入射波矢方向与双折射晶体光轴方向之间的夹角,此时,光束偏离的距离为

$$\Delta l = l \tan \alpha \quad (2)$$

式中: l 为双折射晶体的长; Δl 即为位置 1 和位置 2 之间的距离。

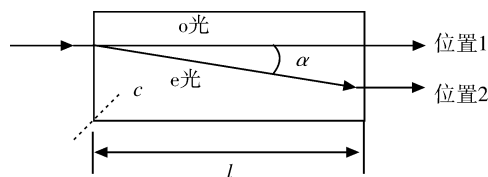


图 2 o 光和 e 光在双折射晶体中的传播

Fig. 2 Propagation of o-ray and e-ray in birefringent crystal

对于第二、第三电光快门 3、5 和双折射晶体 4、6,工作方式一样,通过电光快门 1、3、5 的组合开关,可以使光束偏转到相应的扫描行上,对 8 个可控的光斑位置进行编码,可实现联机控制,具体编码表见表 1。

结合表 1 中的编码,对级联电光棱镜组的电场施加电压进行扫描,对 8 个级联电光棱镜组进行对应操作,位置 1 和第一个级联电光棱镜组同时控制,可实现联机控制的任意行扫描和 8 行的任意方式扫描。单个级联电光棱镜偏转器的扫描方式如图 3 所示,其由一定数目的周期性极化的电光棱镜构成,如果所加的电压 $V_3 = 0$ (V_3 为沿垂直纸面方向施加电场),不同光轴方向的电光晶体的折射率不变,光束不偏转,按原方向在级联棱镜组中传播;如果 $V_3 \neq 0$ 时,折射率发生变化,光束发生偏转,从而实现单行扫描功能;如果所加电压为离散型,则实现数字式扫描,如果所加电压为连续型,则为连续扫描。实际应用中,级联电光偏转器的几何结构可有不同的形式,主要有矩形、梯形、喇叭型和双曲线型等,不同的结构有不同的偏转特性,为便于晶体加工,常用的几何结构为矩形或者梯形。

表 1 3 级数字电光偏转器位置编码表

Table 1 Position coding of 3 orders digital electro-optic deflector

晶体 1	晶体 3	晶体 5	位置	位置码
0	0	0	位置 1	(0,0,0)
V_π	V_π	0	位置 2	(1,1,0)
0	V_π	V_π	位置 3	(0,1,1)
V_π	0	V_π	位置 4	(1,0,1)
0	0	V_π	位置 5	(0,0,1)
V_π	V_π	V_π	位置 6	(1,1,1)
0	V_π	0	位置 7	(0,1,0)
V_π	0	0	位置 8	(1,0,0)

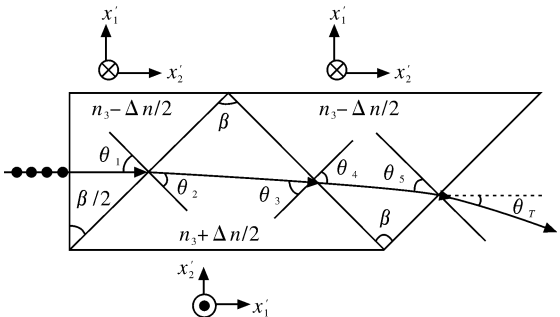


图 3 由 3 块电光晶体棱镜组成的偏转器
Fig. 3 An electro-optic deflector made of by three crystal prisms

对于矩形结构的级联棱镜组,最后出射的偏转角为^[17]

$$\theta_T = \frac{\Delta n \cdot L}{W} \tag{3}$$

式中: Δn 为相邻两块电光晶体的折射率差; L 为矩形结构棱镜组的长度; W 为其宽度。由方程(3)可看出,要增大偏转角度 θ_T ,可增大长度 L 和减小宽度,但因入射激光束有一定尺寸, L 越大, W 越小,可能使光束未传播出棱镜就偏出了宽度 W ,这样偏转范围就受到很大的限制。如果使入口宽度 W 足够小以至于光束能进入,同时随着长度 L 的增加逐渐增大 W ,让光束不至于太早偏出宽度 W ,则可使偏转角度得到进一步增大。因此本文采用梯形结构的级联棱镜组进行具体设计,其优点是易于加工,可获得较大的偏转角度,如图 4 所示。

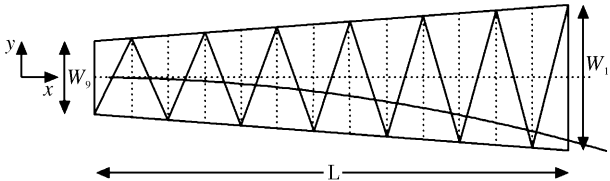


图 4 梯形式级联电光扫描器
Fig. 4 The cascaded electro-optic scanner of trapezium structure

假设入口宽度为 W_0 ,出口宽度为 W_1 ,梯形的长度为 L ,对于梯形偏转器^[1],其出射偏转角为

$$\theta_T(L) = \frac{\Delta n}{n} \frac{L}{W_1 - W_0} \ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right) \tag{4}$$

光束在出口位置偏离的竖直位移为

$$Y(L) = \frac{\Delta n}{n} \frac{L}{W_1 - W_0} \left[\frac{W_1}{W_1 - W_0} \ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right) - 1 \right] L \tag{5}$$

根据方程(5),在不考虑光束发散的情况下,通过合理选择 W_0 , W_1 和 L 的值,可得出光束刚好从出口边界上射出所需的最大的 Δn 为

$$\Delta n_{\max} = \frac{n \left(\frac{W_1 - D}{2} \right)}{\frac{L}{W_1 - W_0} \left[\frac{W_1}{W_1 - W_0} \ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right) - 1 \right] L} \tag{6}$$

式中 D 为光束直径。最大偏转角对应着最大的电压 $V_{\max}$,使 V 从 0 变化到 $V_{\max}$,即可实现一定角度范围的单行扫描,下面根据以上分析给出具体的设计。

3 设计实例

鉴于 DKDP 具有低半波电压,良好的光学均匀性,可制作尺寸较大等优点,选其作为数字电光偏转器的电光开关。KNbO₃ 具有高抗光伤阈值和高电光系数的特点,选择其作为级联电光棱镜组的材料,而半波片和双折射晶体 2,4,6 则采用方解石。在双折射晶体中为获得较大的光束分离,采用最大化偏离条件,此时光轴与晶面法线的夹角为:

$$\varphi_m = \arctan \frac{n_e}{n_o}$$

$$\text{最大偏离角 } \alpha_m = \arctan \frac{n_o^2 - n_e^2}{2n_o n_e}, \text{最大分离距离}$$

为 $\Delta l_m = l \cdot \tan \alpha_m$ 。

从双折射晶体 6 出射的光线必须刚好进入级联棱镜组 8 中,因此要求每行棱镜组的厚度 h 与双折射晶体分离的距离 Δl_m 相等,其厚度 h 又必须

大于光束的直径,才能保证光束进入到级联的电光棱镜组。对于梯形式级联的电光棱镜组,沿 KNbO_3 晶体的 x_3 方向(级联电光棱镜组的厚度方向)加电场,同时使沿 x_3 方向振动的线偏振光入射,则有:

$$\Delta n = n_3^3 \gamma_{33} E_3 = \frac{1}{h} n_3^3 \gamma_{33} V_3 \quad (7)$$

式中 γ_{33} 是 KNbO_3 晶体的电光系数。确定好参数 h ,在合理的选择结构参数 W_0, W_1 和 L 的情况下,根据公式(1)与(2),双折射晶体 2、4、6 的长、宽、高便可以确定。同时结合(6)式,求出最大偏转角的电压为

$$V_{3\max} = \frac{h \Delta n_{\max}}{n_3^3 \gamma_{33}} \quad (8)$$

射出扫描器的最大的偏转角为

$$\theta_{T-\max}(L) = \Delta n_{\max} \frac{L}{W_1 - W_0} \ln\left(\frac{W_1}{W_0}\right) \quad (9)$$

给定每行棱镜组的晶体厚度 h ,梯形入口宽度 W_0 ,则 8 行可控高速光扫描器的 1-6 部件的结构尺寸全部可以确定下来,而对于梯形式级联的电光棱镜组,由(4)~(7)式可知各个结构参数的相互关联和相互制约关系。取 $h=0.5 \text{ mm}$, $W_0=0.5 \text{ mm}$,在电压 $V_{3\max}=6 \text{ kV}$, $L=20 \text{ mm}$ 时,偏转角度与出射宽度的关系如图 5 所示;在最大电压 $V_{3\max}=6 \text{ kV}$,同时满足光线刚好从偏转器边缘射出时,偏转器长度与出射宽度的关系如图 6 所示;在最大电压 $V_{3\max}=6 \text{ kV}$,同时满足光线刚好从偏转器边缘射出时,偏转器的最大偏转角度与出射宽度的关系如图 7 所示。

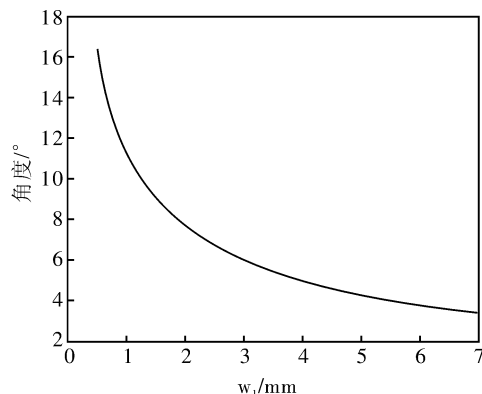


图 5 偏转角度与出射宽度的关系

Fig. 5 Relationship between the deflected angle and the emergent width

从图 7 可看出,在要求的最大电压 $V_{3\max}=6 \text{ kV}$ 下,并且保证光线在偏转器内时,其偏转角度随着 W_1 的增大,先是快速的增大而后缓慢增大,

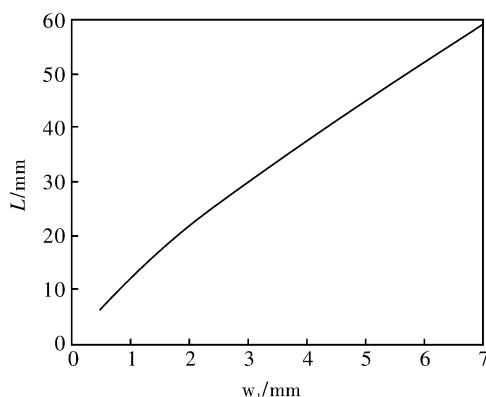


图 6 光线不偏出偏转器时,长度与出射宽度的关系

Fig. 6 Relationship between the length and the emergent width when laser beam is in the deflector

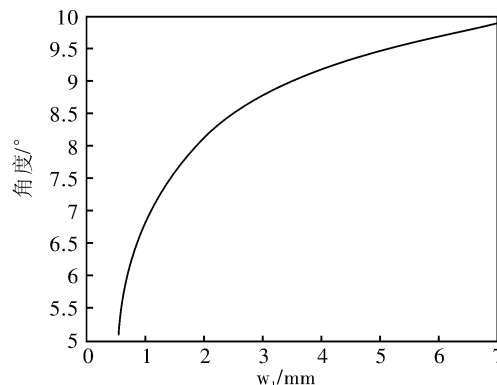


图 7 光线不偏出偏转器时,最大偏转角度与出射宽度的关系

Fig. 7 Relationship between the max deflected angle and the emergent width when laser beam is in the deflector

最后趋于平衡;由图 6 知偏转器的长度随着 W_1 的增大却是线性增大。因此,若选取的 W_1 太大,宽度也相应增大,会使得器件尺寸过大,难以实现,同时偏转的角度却变化不大。因此通过以上图形分析,可以在满足要求的偏转角度内,选取较小的 W_1 来加工。

设使用波长 $\lambda=1.06 \mu\text{m}$,用 DKDP 晶体制作电光快门,相关参数^[18-19]为: $\lambda_{63}=24.1 \text{ pm/V}$, $n_o=1.50$, $n_e=1.46$,半波电压为 $V_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3\lambda_{63}} = 6.54 \text{ kV}$;用 KNbO_3 晶体制作电光棱镜,其中, $n_3=2.11$, $\lambda_{33}=64 \text{ pm/V}$,取梯形厚度 $h=0.5 \text{ mm}$,梯形入口宽度 $W_0=0.5 \text{ mm}$,出口宽度为 $W_1=3 \text{ mm}$,梯形长度为 $L=30 \text{ mm}$,光束的直径为 $D=0.25 \text{ mm}$,由(6)式、(8)式、(9)式计算可得总的偏转角为 $2\theta_{T-\max}=17.256^\circ$,所施加的最大电压为 $V_{3\max}=\pm 5.822 \text{ kV}$ 。最后,设计完成的 8 组梯形结

构级联棱镜组 KNbO_3 中每组的人射宽度 $\times$ 出射宽度 $\times$ 长度 $\times$ 厚度 $=0.5\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$,在不考虑电极厚度的情况下,3块方解石双折射晶体沿光轴取向,尺寸分别为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=0.4\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$, $0.8\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$, $1.6\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,3块DKDP电光快门的尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=0.4\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。

4 结论

针对激光的联机可控扫描,根据电光棱镜的偏转原理,综合电光快门应用,提出了一种电光集成8行任意方式扫描的高速电光扫描器。该扫描器主要由三级数字型的电光偏转器和八组周期性极化梯形结构级联电光棱镜组构成,可进行联机控制扫描。分析了梯形结构级联电光棱镜组的偏转角、长度和宽度之间的相互联系和制约关系,具体设计了一个最大电压为5.822 kV时偏转范围为 17.256° 的高速电光扫描器。和传统的光机械扫描相比,具有高灵敏度无惯性,高扫描速度和高精度的优点,可应用于各种智能化激光高速扫描系统。在实际应用中,可以通过增加数字电光偏转器的级数和相应的级联电光棱镜组数目来扩大扫描范围,一个一级数字电光偏转器,实现2个可控位置的偏转,将 n 级数字电光偏转器组合,可得到 $2n$ 个可控偏转位置,结合 $2n$ 个级联电光棱镜组来实现联机控制的 $2n$ 行任意方式扫描。

参考文献:

- [1] CHIU Y, ZOU J, STANCIL D D, et al. Shape optimized electro-optic beam scanners: analysis, design, and simulation[J]. J. Lightwave Technol., 1999, 17(1):108-114.
- [2] CHEN Q B, CHIU Y, LAMBETH D N, et al. Guided-wave electro-optic beam deflector using domain reversal in LiTaO_3 . J. Lightwave Technol., 1994, 12(8):1401-1404.
- [3] LI J, CHENG H C, KAWAS M J, et al. Electro-optic wafer beam deflector in LiTaO_3 [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(11):1486-1488.
- [4] FANG J C, KAWAS M J, ZOU J, et al. Shape-optimized electro-optic beam scanners: experiment[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(1):66-68.
- [5] 卢秀权,陈绍,沈德忠. KNbO_3 电光偏转器[J]. 中国激光,1998,25(6):519-522.
LU Xiu-quan, CHEN Shao, SHEN De-zhong. A KNbO_3 electro-optic deflector[J]. Chinese Journal of Lasers, 1998, 15(6): 519-522. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 王伟. 新型可调电光偏转器[J]. 压电与声光,1989,11(5):12-16.
WANG Wei. New tunable electro-optic deflector[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 1989, 11(5): 12-16. (in Chinese with an English abstract)
- [7] SCRYMGEOUR D A, BARAD Y, GOPALAN V, et al. Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO_3 fabricated by in situ monitoring of ferroelectric-domain micropatterning [J]. Appl. Optics, 2001, 40(34): 6236-6241.
- [8] SCRYMGEOUR D A, KOC B, TIAN L, et al. Hybrid electrooptic and piezoelectric laser beam steering in two dimensions [J]. J. Lightwave Technol., 2005, 23(9):2772-2777.
- [9] SCRYMGEOUR D A, SHARAN A, GOPALAN V, et al. Cascaded electro-optic scanning of laser light over large angles using domain microengineered ferroelectrics [J]. Appl. Phys. Lett., 2002, 81(17): 3140-3142.
- [10] 石顺祥,李家立,王广生,等. 一种新型的光波导阵列电光快速扫描器[J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1318-1322.
SHI Shun-xiang, LI Jia-li, WANG Guang-sheng. A new type of rapid narrow laser beam electro-optic scanner[J]. Actaoptica Sinica, 2002, 22(11):1318-1322. (in Chinese with an English abstract)
- [11] 梁华伟 石顺祥 李家立. 新型波导阵列电光扫描器特性研究[J]. 光子学报,2008, 37(1):1-5.
LIANG Hua-wei, SHI Shun-xiang, LI Jia-li, Study on characteristics of a novel waveguide array electro-optic scanner[J], Acta Photonica Sinica, 2008 37(1):1-5. (in Chinese with an English abstract)
- [12] 吴新社,蔡毅. 透射式固态电光扫描器设计[J]. 红外与激光工程,2006,35(4):424-428,489.
WU Xin-she, CAI Yi. Design of solid-state electro-optic transmission scanner [J]. Infrared and Laser-Engineering, 2006, 35(4): 424-428, 489. (in Chinese with an English abstract)
- [13] 艾月霞,李景镇,龚向东. 超越曲面电极结构电光偏转器研究[J]. 光学学报,2006,35(1):33-36.
AI Yue-xia, LI Jing-zhen, GONG Xiang-dong.

- Studies on electro-optic deflector with hypersurface electrode structure [J]. Acta Photonica Sinica, 2006,35 (1):33-36. (in Chinese with an English abstract)
- [14] KRISHNAMURTHI M, TIAN Li-li, GOPALAN V. Design and simulation of planar electro-optic switches in ferroelectrics[J]. Applied Physics Letters, 2008,93 (5),052912-1-052912-3.
- [15] HISATAKE S, TADA K, NAGATSUMA T. Linear time-to-space mapping system using double electrooptic beam deflectors[J]. Optics Express, 2008, 16(26),21753-21761.
- [16] BOSCO A, BOOGERT S T, BOORMAN G E. A large aperture electro-optic deflector[J]. Applied Physics Letters, 2009,94(21),211104-1-211104-3.
- [17] 刘晓军, 宋浩, 王益民, 等. 一种激光平行分束器的设计[J]. 应用光学, 2008,29(1):31-34.
- LIU Xiao-jun, SONG Hao, WANG Yi-min, et al. A novel laser beam splitter[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29 (1): 31-34. (in Chinese with an English abstract)
- [18] 蒋民华. 晶体物理[J]. 山东: 山东科学技术出版社, 1980.
- JIANG Min-hua. Crystal physics [J]. Shandong: Shandong Science & Technology Press, 1980. (in Chinese)
- [19] 张克从, 王希敏. 非线性光学晶体材料科学[J]. 北京: 科学出版社, 2005.
- ZHANG Ke-cong, WANG Xi-min, Materials science of nonlinear optical crystal[J]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)