

# 双轴晶体锥形折射扫描研究\*

宁国斌 梁 柱 张大威 赵振明

(长春光学精密机械学院科技开发中心, 长春 130022)

**摘 要** 对双轴晶体锥形折射效应进行了深入研究, 选用  $\text{KNbO}_3$  晶体, 获得  $0\sim 25^\circ$  任意锥角的动态锥形折射。研制出一种新型的激光锥形折射扫描器, 实现全光束大角度锥形折射扫描。

**关键词** 锥形折射, 锥角调制, 激光圆锥扫描。

## 1 引 言

目前国内外所应用的激光扫描, 基本上是一个激光光斑在空间和时间上的移动, 扫描图案是光斑移动的轨迹。本文研究大张角圆锥面激光束的产生以及锥角控制的原理和方法, 实现大视场激光圆锥扫描。通过对光学晶体锥形折射效应的深入研究, 实验上用单个针孔和双轴晶体, 获得  $0\sim 25^\circ$  任意锥角动态锥形折射的圆锥面激光束。研制出的新型激光锥形折射扫描器, 将一束实心激光束通过双轴晶体的一个光轴, 由于锥形折射效应, 产生空心的锥形光束, 用光学调焦或调制入射光会聚角度的方法, 达到对锥形折射光束锥角的控制, 使锥角随时间连续地从小到大或从大到小周期性变化, 利用锥形折射性质, 将入射光全部能量分布在锥形折射光束的锥面上, 实现全光束大角度锥形折射扫描。在垂直圆锥光束轴线的屏幕上, 观察到完整光环孔径大小周期变化的全新扫描图案。激光锥形折射扫描具有很大的应用前景, 可用于激光雷达、光电扫描成像等项技术中。

## 2 全光束大角度动态锥形折射

实验研究表明, 外锥折射的锥角  $\alpha$  与入射于晶体的会聚光夹角  $\alpha_0$  之间满足<sup>[1]</sup>

$$\alpha = \alpha_0. \quad (1)$$

选取  $(n_y^2 - n_x^2)$ 、 $(n_z^2 - n_y^2)$  比较大的  $\text{KNbO}_3$  双轴晶体, 根据晶体光学计算<sup>[2]</sup>,  $\alpha_0 = 8.5^\circ$ 。文献[1]中只讨论了  $\alpha \leq 8.5^\circ$  时(1)式成立的情形, 锥形折射光束锥角随入射光会聚角度而变化。本文进行  $\alpha > 8.5^\circ$  时的锥形折射实验研究, 并且使入射光束的全部能量分布在锥形光束上。

在双轴晶体的两个通光面上放上彼此精确相对的小孔, 当入射会聚光的轴线与双轴晶体光轴重合, 并且会聚光的焦点在双轴晶体入射端面小孔上时, 会聚光沿光轴传播, 与其对应的波矢构成波矢锥面, 观察到由双轴晶体输出端面小孔输出的大角度锥形折射光束。焦点不在入射端面小孔上的其它光线, 被小孔光阑挡掉, 不能通过晶体。去掉入射端面上的小孔, 用会聚光

\* 国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1999-01-28; 收到修改稿日期: 1999-09-20

照射入射端面,使入射光会聚焦点落在入射端面上,并且在焦点和出射端面上的小孔连线与光轴重合时,也会产生锥形折射。不在焦点上的其它光线偏离光轴,通过晶体传播后,被出射端面上的小孔光阑挡掉。所以,只在出射端面放上小孔光阑,也可以获得大角度锥形折射光束。 $\alpha$  由  $8.5^\circ$  增大到  $25^\circ$ ,再由  $25^\circ$  减小到  $8.5^\circ$  时,获得  $8.5 \sim 25^\circ$  任意锥角的动态锥形折射光束。实验结果表明,在  $\alpha > 8.5^\circ$  的情况下,(1) 式仍然成立。另外,实验测得,由双轴晶体出射端面小孔光阑出射的锥形折射光束的光能量,大约占入射光能量的  $30\% \sim 35\%$  左右。实验中发现并研究证明,只有焦点在入射端面上的所有光线,经过晶体后,分布在锥形折射光束锥面上。因为在双轴晶体入射端面上会聚光束的焦点,对应着会聚透镜同一孔径带上光线会聚的角度,由双轴晶体沿光线光轴方向取出这一孔径带上的光束,成为空心锥形折射光束。说明双轴晶体沿光线光轴方向具有信息复现的性质。由这一性质可以使入射光束携带的信息,经双轴晶体后再现。根据此项性质,利用锥形反射尖劈,将一束实心激光束,反射成圆环光,经过透镜将圆环光会聚后入射于双轴晶体的入射端面,由晶体锥形折射后,入射光束全部能量分布在锥形折射光束锥面上,实现全光束大角度动态锥形折射。

### 3 双轴晶体锥形折射扫描

根据(1) 式  $\alpha = \alpha$  的锥形折射,改变入射会聚光束的会聚角度  $\alpha$ ,可以达到对锥形折射光束锥角  $\alpha$  的调制,使锥形光束锥角随入射光会聚角周期地变化,实现双轴晶体锥形折射扫描,扫描原理装置如图 1 所示。图中  $L_1$  为负透镜,  $L_2$  为正透镜,  $G$  是  $\text{KNbO}_3$  双轴晶体,  $A$  为放置在双轴晶体  $G$  出射端面上的小孔。入射于  $L_1$  透镜的光,是经锥形尖劈反射后的圆环光。实验中沿水平方向前后移动  $L_1$ ,使入射于  $L_2$  上的光环直径大小变化。通过  $L_2$  折射后,会聚光束的会聚角度也随着变化,经双轴晶体  $G$  锥形折射后输出,在观察屏上观察到全光束大角度动态锥形折射的光环孔径大小变化的扫描。沿水平方向前后移动透镜  $L_2$  时,在屏上观察到的现象和移动  $L_1$  的情况完全相同。

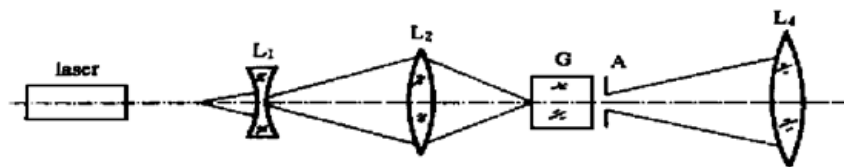


Fig. 1 Conic Refractive Scanning instrument

在图 1 中小孔  $A$  的孔径很小,一般只有十几至几十微米。在晶体  $G$  入射端面上的会聚光束焦点和小孔  $A$  的连线与光轴重合时,才能产生锥形折射光束。一般要求低速扫描,可以利用前后移动  $L_1$  或  $L_2$  透镜进行锥形折射扫描。但在实际应用中有时需要高速扫描时,要求精度很高,就很难保证晶体入射端面上入射光焦点和小孔  $A$  的连线与晶体光轴重合。但是由图 1 所示装置,除  $L_4$  外的系统可以等效于透镜  $L_3$ ,焦点在小孔  $A$  上,焦距  $f'_3 = f'_2 + l$ ,  $l$  为晶体  $G$  沿系统轴方向的长度,实际应用中晶体  $l$  很小,所以  $f'_3 \approx f'_2$ 。根据应用光学两个光组组合的理论<sup>[3]</sup>,可选择适当的透镜  $L_4$  与  $L_3$  组合。如果光组位于空气中,则组合后等效光学系统的焦距为

$$f' = -f = f'_3 f'_4 / (f'_3 + f'_4 - d), \quad (2)$$

式中  $f'_2, f'_3, f'_4$  分别为透镜  $L_2$ 、等效透镜  $L_3$  和透镜像方焦距。等效系统的光焦度

$$\Phi = \Phi_3 + \Phi_4 - d\Phi_3\Phi_4 \quad (3)$$

(2)、(3) 式中的  $d$  为等效透镜  $L_3$  主平面与透镜  $L_4$  主平面之间的间隔,  $\Phi_3$ 、 $\Phi_4$  分别为等效透镜  $L_3$  和透镜  $L_4$  的光焦度。等效光学系统的垂轴放大率为:

$$\beta = f_3 f_4 / (f_3 f_3' - x_1 \Delta) \quad (4)$$

式中  $f_3$ 、 $f_4$  分别为等效透镜  $L_3$  和透镜  $L_4$  的物方焦距,  $\Delta$  为光学间隔。按照图 1 调节后, 使系统产生锥形折射光束。透镜  $L_4$  与左面系统同轴, 并且主面垂直系统轴, 组合成等效光学系统。当  $L_4$  周期地沿轴前后移动时, 等效光学系统中的主面间间隔  $d$ 、光学间隔  $\Delta$  也随着周期地大小变化。由(2)、(3)、(4) 式可以看出, 等效光学系统的焦距  $f'$ 、光焦度  $\Phi$ 、放大率  $\beta$  也随之变化。由  $f'$  与  $d$  及  $\beta$  与  $\Delta$  的关系可以看出, 等效光学系统可以成为会聚系统, 也可以成为望远镜系统, 还可以成为发散系统。在实际应用中,  $d$  和  $\Delta$  的变化, 使等效系统在会聚与望远之间成为周期变化的光学系统。在观察屏上可以观察到一个完整的锥形折射光环孔径大小周期变化的圆环扫描图案, 实现圆锥角被调制的高速激光锥形折射扫描。

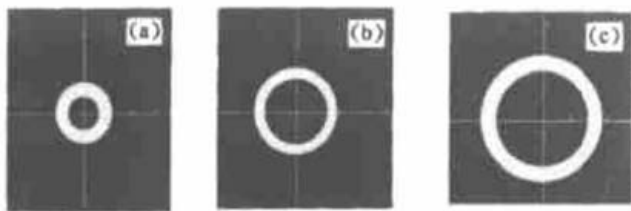


Fig. 2 Transverse cross-section rings of the conic beam at different moments

图 2 所示为全光束大角度锥形折射扫描时, 在空间某一固定位置, 垂直于扫描光束轴线的截面上, 不同时刻光环孔径大小的变化, 入射激光束全部光能量分布在光环上, 实现了双轴晶体锥形折射激光圆锥扫描。锥角扫描范围为  $0 \sim 20^\circ$ , 扫描频率为  $1 \sim 20$  Hz, 且扫描锥角范围和扫描频率均可调, 光源可以选择各种波长的连续输出

或脉冲输出的激光器。

### 参 考 文 献

- [1] 宁国斌, 梁柱. 激光动态外锥折射实验研究. 光学学报, 1998, 18 (10): 1399~ 1403
- [2] M 玻恩, E 沃耳夫. 光学原理. 杨葭荪等译校. 北京: 科学出版社, 1981. 912
- [3] 张以谟. 应用光学. 北京: 机械工业出版社, 1990. 46

## Conic Scanning of Biaxial Crystal

Ning Guobin Liang Zhu Zhang Dawei Zhao Zhenming

(Development Center of Science and Technology, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

(Received 28 July 1999; revised 20 September 1999)

**Abstract** The conical refraction effect of biaxial crystal is studied deeply. Dynamic conic refraction of any conical angle within the range of  $0 \sim 25^\circ$  is obtained using  $\text{KN-bO}_3$  crystal with a single pin-hole aperture. The principles of conical refractive scanning (CRS) and a novel laser CRS instrument are developed. Spatial CRS within modulated conical angle is realized.

**Key words** conical refractive, conical angle modulation, laser conical scanning.