

文章编号: 0258-7025(2006)03-0391-05

# 发射和接收光束同时开关的激光测距法

赵 栋, 刘立人, 王吉明, 潘卫清, 郎海涛

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 采用同一电光器件对发射和接收光束同时开关的原理, 提出了一种新颖的激光测距方法。光源发出的连续激光被待测目标反射后, 往返两次通过光源端的电光晶体, 在晶体上施加边沿急速变化的电压, 利用其高速响应的开关特性, 同时对往返光线产生影响, 截取出一段包含激光往返待测距离所需时间信息的光强变化曲线。实验中利用雪崩管电路实现了纳秒级的高压上升沿, 并利用单轴晶体的双折射和全内双反射性质, 用特殊结构的单块 LiNbO<sub>3</sub> 晶体实现了该方法的测距装置。示波器分析的实验结果验证了该方法的可行性, 从而为激光测距开拓了一种新的思路。

**关键词** 测量; 激光测距; 电光效应; 双折射; 全内双反射

**中图分类号** P 225.2 **文献标识码** A

## Laser Ranging by Simultaneous Switching of Transmitting and Receiving Beams

ZHAO Dong, LIU Li-ren, WANG Ji-ming, PAN Wei-qing, LANG Hai-tao

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

**Abstract** By simultaneous switching of transmitting and receiving beams in an electro-optical device, a novel laser ranging method is proposed. Continuous wave (CW) laser emitted by laser transmitter goes forward to the measured object, being reflected by the object, then goes back to the transmitter. Close to the transmitter, an electro-optical crystal is added into the round-trip light rays. High voltage curve with the steep enough edges is added on the crystal. Because of the high speed switch effect, the crystal operates on the transmitting and receiving beams at the same time. So light pulses, whose width  $T$  contains the required range information, are cut off and detected. In experiments the changing time of high voltage is about several nanoseconds realized by avalanche triode circuit. And based on double refraction and total internal double reflection effect in crystal, a single block LiNbO<sub>3</sub> crystal with special shape is designed as the main device of this method. The feasibility of the new idea is proved by the results from oscillograph. So a brand-new way for the laser ranging is provided.

**Key words** measurement; laser ranging; electro-optic effect; double refraction; total internal double reflection

## 1 引 言

利用晶体的一次电光效应, 可以通过调节施加在其上的电压, 使通过晶体的激光两个偏振分量间产生相位差, 从而快速地改变出射光的偏振状态<sup>[1,2]</sup>。通过急速改变电压大小、控制往返晶体和待测目标之间光线的偏振状态, 晶体电光效应的这些特性可以应用到激光测距领域中; 同时各向异性的单轴晶体具有双折射和双反射效应, 可以使用特殊结构的单块晶体完成起偏、检偏和电光调制的集

成化, 从而用一块晶体来完成激光测距过程中待测距离信息的分析、提取全过程。

目前国内外常用的激光测距方法有: 利用光脉冲为载体的脉冲飞行时间测距法, 利用激光调制相位为信息载体的相位测距法, 利用调频信息为载体的频率测距法, 以及以上方法的混合测距法<sup>[3~8]</sup>。这些激光测距方法均需要复杂的附加电路装置来进行距离信息的分离和提取。本测距法主要通过光学方法完成待测距离信息的处理和提取过程, 结构简单易行。

收稿日期: 2005-05-17; 收到修改稿日期: 2005-08-31

作者简介: 赵 栋(1979—), 男, 河南南阳人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事激光测距的研究。E-mail: zhaodong@siom.ac.cn

## 2 测距方法及主体装置

基本思想如图 1 所示,激光器发射出一束连续激光,遇到待测物体反射后返回。此时如果能在光源端“瞬时”插入一个与光传播方向成  $45^\circ$  角的反射镜,使其反射面面向待测物体,则激光器发出的光被隔断;同一时刻,由待测物体反射回来的光也被隔断,并且被反射镜反射到另一方向。这样,在插入反射镜后,其右侧和待测物体之间往返的光束两端同时被截断,从而形成一个矩形光脉冲。由探测器接收此脉冲,则脉冲宽度  $T$  即为激光往返反射镜和待测物体之间距离  $R$  所需的时间。测得脉宽  $T$ ,即可得待测距离

$$R = cT/2, \quad (1)$$

其中  $c$  为光在空气中的传播速度。

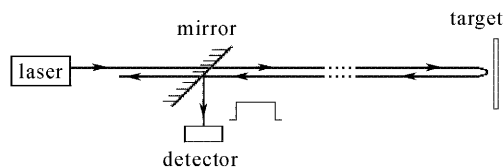


图 1 “瞬时”插入反射镜截取光脉冲

Fig. 1 Getting light pulse by “instantaneously” inserting a reflect mirror

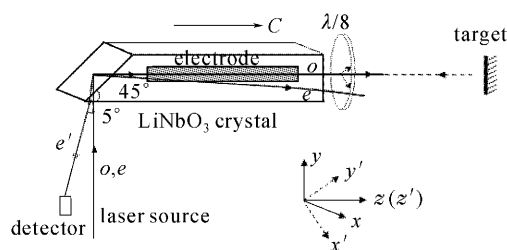


图 2 利用斜  $45^\circ$  角切割的长方体  $\text{LiNbO}_3$  晶体实现激光测距

Fig. 2 Laser ranging using a  $45^\circ$  cut rectangular parallelepiped  $\text{LiNbO}_3$  crystal

晶体的折射率变化对电压有着极高的响应速度,可以利用单轴晶体的一次电光效应实现上述在光路中“瞬时”插入反射镜的功能。如图 2 所示,使用一个带有  $45^\circ$  倾角的长方体单块  $\text{LiNbO}_3$  晶体完成提取光脉冲的功能,图中参考坐标系对应于晶体的物理参考轴。晶体斜面分别与坐标  $y, z$  轴成  $45^\circ$  角,与  $x$  轴平行,光轴  $C$  沿坐标  $z$  方向。当光源发出的无规偏振光在  $45^\circ$  斜面下方垂直于晶体表面入射后,由于波矢方向垂直于光轴,无规偏振光分解为同一方向上传播的两束线偏振光  $o$  光和  $e$  光。由于斜面

与光轴成  $45^\circ$  角,两束线偏振光将在  $45^\circ$  斜面上产生全反射(临界角约  $28^\circ$ )。由实验室前期对偏振光在晶体表面的连续双折射和全内双反射效应的研究工作<sup>[9~13]</sup>可知,反射后, $o$  光平行于晶轴方向出射晶体; $e$  光则偏离  $z$  轴下方约  $2^\circ$  离开斜面,并在晶体右表面折射后,最终以偏离  $z$  轴约  $5^\circ$  的方向出射晶体,成为无用光。

在晶体的两个  $yz$  平面上沿  $o$  光行进方向加上一对电极片,大小刚好覆盖  $o$  光。当不加电压时,出射的  $o$  光遇到待测物体反射后原路返回,按照相同路线又完成全反射回到光源端。施加电压后,所加电场平行  $x$  轴,晶体感应主轴  $x', y'$  绕原主轴  $x, y$  旋转  $45^\circ$ ,电感应主折射率椭球为

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22}E\right)x'^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22}E\right)y'^2 + \frac{1}{n_e^2}z'^2 = 1, \quad (2)$$

式中  $\gamma_{22}$  为晶体电光子数的对应分量。

在晶体上“瞬间”加载半波电压  $V_\pi$ ,一方面,被待测物体反射后的回射光被晶体电光调制,由原来沿  $x$  轴偏振的  $o$  光变为沿  $y$  轴偏振的  $e'$  光,遇到  $45^\circ$  斜面后发生全内反射,偏离  $-y$  轴左方约  $2^\circ$  反射,并最终偏离  $-y$  轴约  $5^\circ$  的方向出射晶体,进入探测器<sup>[9~13]</sup>,成为提取到光脉冲的前沿(上升沿);与此同时,在加电压的“瞬间”,沿  $x$  轴偏振的出射  $o$  光也被晶体进行电光调制,变为沿  $y$  轴偏振的  $e'$  光,此  $e'$  光随后经待测物体反射回来后被晶体进行第二次电光调制,又变为沿  $x$  轴偏振的  $o$  光,此  $o$  光经斜面全反射后返回光源端,此时探测器端接收到的光能量终止,形成接收光脉冲的后沿(下降沿)。综上所述,随着在晶体上快速施加半波电压  $V_\pi$ ,此单块晶体就完成了对待测距离信息的分析和提取过程,在探测器端得到了一个包含待测距离  $R$  信息的光脉冲。

## 3 理论分析

假设以足够快的速度在晶体上加半波电压后的波形如图 3(a)所示,电压在  $t_r$  的上升时间内从零跳变到  $V_\pi$ ,并保持一段时间。先考虑最简单的情况,假设电场对光强的调制是绝对线性的,并且渡越时间  $t_d$  为零,则探测器接受到的光脉冲应如图 3(b)所示。图中标出的两个拐点之间的宽度  $T$  即是光往返晶体和待测物体之间所需的时间。因此如何准确标定两个拐点的位置是减小测距误差的关键问题,而光脉冲的振幅和形状只要满足观察需要即可。但实际中,

图 2 晶体的电光调制过程中电压和光强之间的关系并非线性, 方程表示为

$$|E_{\perp}|^2 = \frac{1}{2} I_m \{1 - \cos[Mf(t)]\}, \quad (3)$$

其中  $I_m$  为入射光强峰值,  $f(t)$  为所加电压归一化波形,  $M$  代表峰值电压产生的相位差

$$M = \frac{2\pi l}{\lambda} \frac{V_m}{d} (n_0^3 \gamma_{22}), \quad (4)$$

其中  $l$  为晶体所加电极片在通光方向上的长度,  $d$  为晶体在电场方向上的厚度,  $\lambda$  为激光波长,  $V_m$  为所加电压最大值,  $n_0$  为晶体的本征折射率。图 3(c) 所示为调制光强随相位差  $Mf(t)$  变化的示意曲线图。可见, 在电压从零跳变的瞬间(即曲线原点处), 线性度最差, 这样会降低探测到光脉冲曲线拐点处的陡峭程度, 增加确定拐点位置的误差, 如图 3(d) 所示。为消除这种影响, 可在晶体右端口附加一个  $1/8$  波片(图 2 浅色虚线所示), 使两次通过波片的往返光路共产生  $\pi/2$  的附加相位差, 并改变所加跳变电压的最大值为半波电压的一半, 即  $V_m = V_{\pi/2}$ , 此时, 方程(3)变为

$$|E_{\perp}|^2 = \frac{1}{2} I_m \left\{1 - \cos\left[\frac{\pi}{2} + Mf(t)\right]\right\}, \quad (5)$$

即使电压上升瞬间的位置移到图 3(c) 曲线中黑点所示的线性区域中。引入  $1/8$  波片后, 在不加电压的情况下探测器接收到光强的一半, 加上电压  $V_{\pi/2}$  后, 如图 3(e) 所示, 接收到的脉冲强度是原来的一

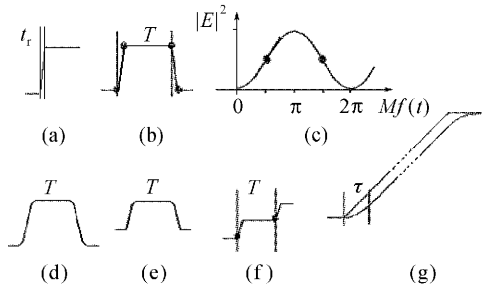


图 3 对不同情况下探测到的光强曲线进行理论分析  
(a) 加载电压波形; (b) 理想光脉冲波形; (c) 光强和相位差(电压)关系曲线; (d) 非线性对脉冲拐点的影响; (e) 附加  $\pi/2$  相位差后的光脉冲; (f) 其他电压极值时得不到完整光脉冲; (g) 渡越时间对脉冲拐点的影响

Fig. 3 Theory analysis on light intensity curve detected in different conditions

(a) waveform of loaded voltage; (b) detected ideal waveform of light pulse; (c) curve of light intensity versus phase difference; (d) influence on inflection points from nonlinearity; (e) light pulse after adding a phase difference  $\pi/2$ ; (f) imperfect pulse waveform at other peak voltages; (g) influence on inflection points from transit-time

半, 但在其中两个拐点处光强曲线保持了原电压曲线的陡峭程度。此外, 如果施加电压最大值  $V_m$  取  $V_{\pi/2}$  (加  $1/8$  波片) 或  $V_{\pi}$  (不加  $1/8$  波片) 外的其他值时, 探测到的光强曲线不再是一个完整的光脉冲, 而是类似图 3(f) 所示的阶梯形状, 此时只要找到两个对应电压变化瞬间的拐点位置, 仍然不影响对距离的测量。另外, 激光在被晶体进行电光调制时的渡越时间  $\tau$  也会对拐点产生影响, 如图 3(g) 所示, 使拐点处趋于平滑。但减小渡越时间  $\tau$  (减小电极片长度  $l$ ) 也会相应地增大半波电压, 在实际应用中应综合考虑, 使渡越时间对测量的影响减小到可以接受的误差范围之内。

本方法测距的精度依赖于对光强变化曲线拐点的辨别精确程度, 假设在光强曲线的平稳阶段, 由于各种噪声的影响而引起的振幅抖动最大值为  $\delta_I$ , 则当振幅跳变大于  $\delta_I$  时可判断为拐点已经产生, 此时引起的时间误差为

$$\delta_T = \delta_I \times (dt/dI) = \delta_I \times [dt/d(|E_{\perp}|^2)], \quad (6)$$

其中  $dt/dI$  代表光强曲线拐点处跳变的斜率的倒数, 斜率越大, 引起的时间误差越小。将式(5)代入(6)式, 并取初始条件  $f(t) = 0$  可得

$$\delta_T = \delta_I \times [dt/(I_m \times M \times df/2)], \quad (7)$$

其中  $df/dt$  表示施加电压曲线的斜率的倒数。可见, 要提高测距的精度, 除了抑制探测系统的噪声外, 还需要注意以下的因素: 1) 激光方面, 增加光强可减小引起的时间误差; 2) 晶体方面, 单位电压引起的相位差, 由式(4)可知主要取决于晶体本身的性能, 在折射率和电光系数确定的情况下, 晶体所加电场部分纵横比  $l/d$  增大可减小测距误差, 但是通光方向电极片长度  $l$  的增加, 会增加渡越时间, 进而影响光强曲线拐点处的线性程度; 3) 获得一个高质量的电脉冲曲线是提高测距精度的重要部分, 抖动微小, 急速跳变到高电压, 尤其是在零点处的大斜率, 以及跳变后保持一定时间的水平稳定, 都是完成本测距方法所需要的。

## 4 实 验

图 4 为实验装置图, 图中实线代表光路, 点划线代表电路。由 He-Ne 激光器发出波长  $633 \text{ nm}$  的连续激光, 光斑直径  $1 \text{ mm}$ , 经一反射镜垂直晶体表面进入  $\text{LiNbO}_3$  后发生全内反射, 出射晶体位置处由一小孔限制返回光斑的大小, 探测目标由一反射镜

代替,晶体尺寸为 $3\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ ,电极片在通光方向长度 $15\text{ mm}$ ,高宽比 $5:1$ ,实验测得半波电压为 $817\text{ V}$ ,探测器采用电子科技集团44所生产的GD4251Y激光接受组件,由泰克TDS3052B示波器(带宽 $500\text{ MHz}$ ,采样率 $5\times 10^{-4}\text{ T/s}$ )连接光电二极管,对探测到的光强波形进行分析,由一台电脑连接高压电脉冲发生电路和示波器,控制产生一定频率的电脉冲和对示波器传来的光脉冲信号进行记录分析。实验测试距离为 $18\text{ m}$ 左右。

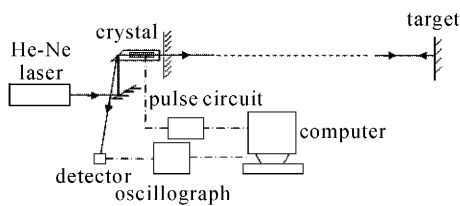


图4 实验装置图

Fig. 4 Real devices in experiment

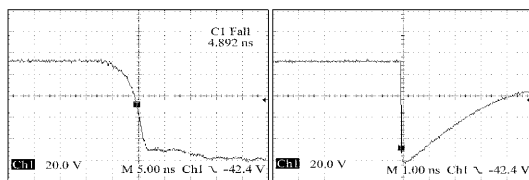


图5 雪崩三极管电路产生的电脉冲波形图

Fig. 5 Voltage pulse curve from avalanche triode circuit

在实验中,如何实现“瞬时”地加电压是问题的关键,可利用雪崩管的雪崩效应来实现电压的急速变化。图5是实验中测得级联5551雪崩管电路产生的电脉冲波形(电阻 $1:10$ 分压测量),测量高压脉冲用示波器为泰克TDS784D(带宽 $1\text{ GHz}$ ,采样率 $4\times 10^{-4}\text{ T/s}$ ),测得雪崩前沿 $<5\text{ ns}$ ,电容放电后沿约 $20\text{ }\mu\text{s}$ ,此后沿长度可通过改变电容和电阻调节大小。在本实验中 $20\text{ }\mu\text{s}$ 远大于往返待测距离 $18\text{ m}$ 所需的时间 $120\text{ ns}$ ,可近似认为在 $120\text{ ns}$ 内电脉冲后沿保持水平。

由于在电子方面的实验条件所限,探测系统带宽只有 $10\text{ MHz}$ ,这样对高速变化的光强曲线边沿就不能及时响应。实验中,在施加振幅为半波电压 $817\text{ V}$ 的电脉冲情况下,示波器显示探测到的光强曲线如图6所示,可以观察到一段被截取的光脉冲,但脉冲曲线边沿已不能正确反映,拐点位置亦不能精确确定。预期在提高了探测带宽的后续实验中,会有更加精确的实验结果。

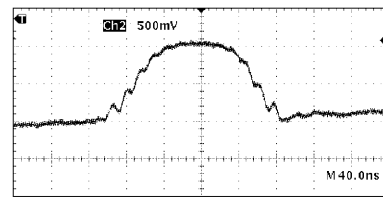


图6 探测器接收到的光强曲线

Fig. 6 Light intensity curve from detector system

同时,所加电脉冲的性能参数限定了测距范围和测距采样率,在电脉冲前沿时间为 $t_r$ ,电容放电后沿时间为 $t_f$ 的情况下,最小测距范围: $t_r \times c/2$ ,在光强允许的情况下,最大测距范围: $t_f \times c/2$ ,测距采样最大频率: $1/(t_r + t_f)$ ,在本实验中电脉冲的条件下,测距范围 $0.75\text{ m} < R < 2400\text{ m}$ ,测距最大采样率 $< 50\text{ kHz}$ 。

## 5 结 论

基于晶体快速的电光效应,本文提出了一种新颖的激光测距方法,只需一个陡峭的电压变化边沿,就可截取到包含待测距离信息的光强变化曲线;并利用单轴晶体的双折射和双反射现象,使用一斜 $45^\circ$ 倾角切割的单块长方体 $\text{LiNbO}_3$ 晶体作主体器件实现了该方法。在进行了一定的理论分析后,通过实验验证了该方法的可行性,从而为激光测距领域提供了一条新的思路。

## 参 考 文 献

- 1 A. Yariv, P. Yeh. Optical Waves in Crystals [M]. New York: Wiley, 1984
- 2 Jiang Minhua. Crystal Physics [M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1980  
蒋民华. 晶体物理[M]. 济南:山东科学技术出版社, 1980
- 3 Ari Kilpelä. Pulsed Time-of-Flight Laser Range Finder Techniques for Fast, High Precision Measurement Applications [M]. Finland: Oulu University Press, 2004
- 4 Raimo Ahola, Risto Myllyla. A new method for measuring the time-of-flight in fast laser range finding [C]. SPIE, 1986, **654**: 19~21
- 5 I. Fujima, K. Seta, H. Matsumoto *et al.*. GHz traveling-wave optical modulator for precision distance measurement [C]. SPIE, 1988, **889**: 86~90
- 6 K. Seta, T. O'ishi. Distance measurement using a pulse train emitted from a laser diode [J]. J. Appl. Phys., 1987, **26** (10): 1690~1692
- 7 K. Nakamura, T. Hara, M. Yoshida *et al.*. Optical frequency domain ranging by a frequency-shifted feedback laser [J]. IEEE J. Quantum Electron., 2000, **36**(3): 305~316
- 8 E. A. Wachter, W. G. Fisher. Coherent-burst laser ranging: decoupling resolution and unambiguous range [J]. Opt. Lett., 1997, **22**(8): 570~572

- 9 Ren Haixia, Liu Liren, Song Zhe *et al.*. Double refraction and reflection sequential interfaces in a crystal and application to integration of  $1 \times N$  optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):152~157  
任海霞,刘立人,宋 哲 等. 晶体的连续双折射双反射及其集成应用:  $1 \times N$  电光开关[J]. 光学学报, 2004, **24**(2):152~157
- 10 Song Zhe, Liu Liren, Ren Haixia *et al.*. Integrated optical bypass-exchange switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 777~780  
宋 哲,刘立人,任海霞 等. 单块晶体  $2 \times 2$  光开关[J]. 光学学报, 2004, **24**(6):777~780
- 11 Haixia Ren, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Double refraction and reflection of sequential interfaces in a crystal and application to integration of  $1 \times N$  optical switch [J]. *Journal of Modern Optics*, 2003, **50**(14):2231~2242
- 12 Haixia Ren, Liren Liu, Zhe Song *et al.*. Single LiNbO<sub>3</sub> slab integrated  $1 \times N$  electro-optic switch [C]. *SPIE*, 2003, **5201**: 180~189
- 13 Haixia Ren, Liren Liu, De'an Liu *et al.*. Double refraction and reflection of sequential crystal interfaces with arbitrary orientation of the optic axis and application to optimum design [J]. *Journal of Modern Optics*, 2005, **52**(4):529~539