

文章编号 :0253-2239(2002)11-1318-05

# 一种新型的光波导阵列电光快速扫描器

石顺祥<sup>1)</sup> 李家立<sup>1)</sup> 王广生<sup>2)</sup> 花吉珍<sup>3)</sup>

(1),西安电子科技大学技术物理学院,西安 710071  
(2),中国空空导弹研究院,洛阳 471009  
(3),信息产业部电子第十三研究所,石家庄 050002

摘要: 研究一种新型的光波导阵列电光快速扫描器,分析了它的工作原理及光波导阵列结构对输出光空间分布特性的影响,并通过实验验证了器件的扫描特性,指出这种光波导阵列器件可以用很小的控制电压( $< 10\text{ V}$ )实现二维空间快速宽视场窄光束扫描。

关键词: 激光扫描;光波导阵列;电光效应

中图分类号:TN820.2<sup>+</sup>3 文献标识码:A

## 1 引 言

在光电子系统中,激光扫描是一项极其重要的技术。目前,可供采用的扫描技术有光-机扫描、电-光扫描、声-光扫描、压电扫描等。其中,光-机扫描已在许多系统中采用,它的主要优点是扫描范围大、光损耗小、结构简单,其主要缺点是由于机械转动元件的存在,使得扫描寻址速度慢,且其线性扫描范围有限,电-光、声-光扫描技术的扫描寻址速度快、可控性好,但是传统的电-光、声-光扫描技术控制电压高、扫描范围小、光损耗大,这些缺点影响了它们的实际应用。

随着光电子技术和微电子技术的发展,在 20 世纪 80 年代末,美国东哈特福德的联合技术研究中心(United Technologies Research Center)提出了利用光波导阵列电光效应实现快速扫描的概念<sup>[1,2]</sup>。我们对其进行了深入的研究,并研制了一种新型光波导阵列电光快速扫描器件,获得了初步成果。本文报道所研究的新型光波导阵列电光扫描器的工作原理、扫描特性和实验研究结果。

## 2 理论研究

本文所研究的光波导阵列电光快速扫描系统的总体结构如图 1 所示。该扫描系统的核心元件是光波导阵列电光扫描器。下面对它进行详细讨论。

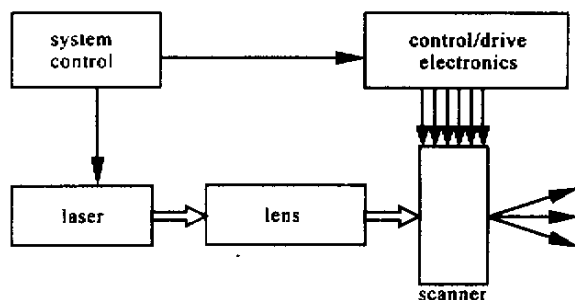


Fig.1 System of rapid narrow laser beam electro-optic scanner

## 3 光波导阵列电光快速扫描器的工作原理

我们研制的光波导阵列电光快速扫描器结构如图 2 所示,它是通过金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术沿(001)方向外延生长的多层 AlGaAs 光波导阵列,其中本征半导体层为光波导层,掺杂半

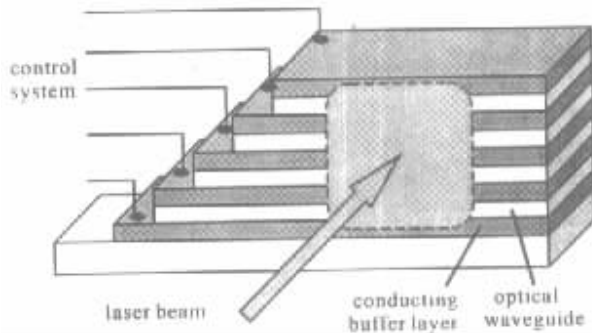


Fig.2 Structure of rapid narrow laser beam electro-optic scanner

导体层为电极层。外加控制电压的这种器件,可视为利用电光效应实现的电控可变光栅器件,也可看作是微波相控阵雷达扫描天线系统的光学模拟。

### 3.1 Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 的电光效应

在原子分数  $x$  很小的情况下,Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 晶体的电光效应可用  $\bar{4}3m$  晶体的折射率椭球描述<sup>[3]</sup>。如图 3 所示,垂直于(001)面外加电场  $E_z$  时( $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标为晶轴方向)感应折射率椭球方程为

$$\frac{x^2 + y^2 + z^2}{n_0^2} + 2\gamma_{41} E_z xy = 1, \quad (1)$$

其中  $n_0$  为 AlGaAs 的折射率,  $\gamma_{41}$  为晶体的线性电光系数。在其感应主轴坐标系  $O-x'y'z'$  中感应折射率椭球方程为

$$\left(\frac{1}{n_0^2} + \gamma_{41} E_z\right)x'^2 + \left(\frac{1}{n_0^2} - \gamma_{41} E_z\right)y'^2 + \frac{1}{n_0^2}z'^2 = 1, \quad (2)$$

一束  $y'$  向振动的线偏振光沿  $x'$  方向通过长度为  $L$  的晶体时,由于电光效应引起的相位延迟增量为

$$\Delta\varphi_x = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_y L = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} E_z L/2 = \frac{\pi}{a\lambda} n_0^3 \gamma_{41} UL, \quad (3)$$

式中,  $a$  为晶体沿  $z$  向的厚度,  $U$  为外加电压。

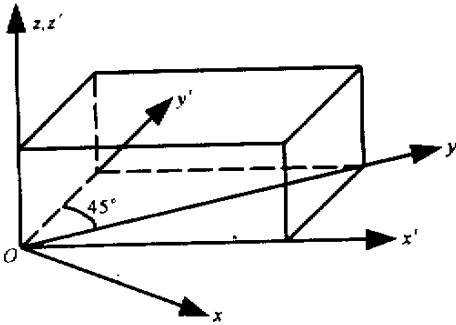


Fig.3 Electrooptic axis and induced electrooptic axis of AlGaAs crystal

### 3.2 光波导阵列的电控光束偏转

对于图 2 所示的光波导阵列,在理想情况下可视为沿  $z$  方向周期性变化的光栅。根据物理光学理论<sup>[3]</sup>,光栅输出光强的空间分布为

$$I(P) = I_0 \left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2 \left[\frac{\sin(N\Delta\varphi/2)}{\sin(\Delta\varphi/2)}\right]^2, \quad (4)$$

其中,  $I_0$  为单缝衍射情况下光轴上的光强,  $N$  为光波导层数,  $\Delta\varphi = (2\pi d \sin\theta)/\lambda$ ,  $\alpha = (\pi a \sin\theta)/\lambda$ ,  $d$  为光栅常数,  $a$  为光栅缝宽。如果对每个波导层上外加适当的电压,该光波导阵列即相当于电控可变光栅。根据电光效应,相邻波导层上所加的电压差值为

$\Delta U$  时,其折射率差为  $\Delta n = n_0^3 \gamma_{41} \Delta U/2a$ ,光通过这两个相邻波导后在空间  $P$  点产生光场的相位延迟差为  $\Delta\varphi$ ,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta + \Delta\varphi_x, \quad (5)$$

$$\text{其中 } \Delta\varphi_x = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \Delta U \frac{L}{a}, \quad (6)$$

光栅方程为

$$\frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta + \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \Delta U \frac{L}{a} = 2m\pi, \quad (7)$$

( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )

因此,整个光波导阵列可看作光程差为沿  $z$  方向周期性、阶梯状变化的“光楔”,光通过这种外加控制电压的光波导阵列后,即可产生光束偏转。 $m = 0$  时的主瓣偏转角  $\theta$  与  $\Delta U$  的关系为

$$\theta = -\arcsin\left(\frac{L}{2ad} n_0^3 \gamma_{41} \Delta U\right). \quad (8)$$

对 AlGaAs 材料取  $n_0 = 3.5$ ,  $\gamma_{41} = 1.1 \times 10^{-12}$  m/V, 当  $d = 1.5 \mu\text{m}$ 、 $a = 1.2 \mu\text{m}$ 、 $L = 0.8$  cm 时,  $\theta$  与  $\Delta U$  的关系如图 4 所示。

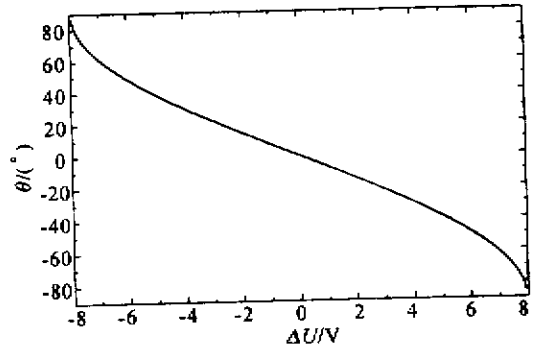


Fig.4 Relation of  $\theta$  versus  $\Delta U$

由图 4 可见,适当地改变光波导阵列的控制电压,即可通过线性电光效应实现光束的空间扫描。并且,对于一定的光波导阵列,扫描角  $\theta$  与  $\Delta U$  在很大的范围内呈线性关系。图 5 绘出了  $N = 7$ 、 $d = 1.5 \mu\text{m}$ 、 $a = 1.2 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$  时,当  $\Delta\varphi_x = 0$ 、 $\Delta\varphi_x = 1$ 、 $\Delta\varphi_x = \infty$  相应的  $\Delta U$  分别为 0、0.84 V、1.68 V 时,输出光束的相对光强空间分布。

如果将这样的两个扫描器件正交放置,即可实现激光在空间的二维扫描。

## 4 光波导阵列电光快速扫描器工作特性的理论分析

根据上述工作原理,对理想光波导阵列电光快速扫描器的工作特性进行了理论分析。在理论计算中

分别以  $a$ 、 $d$ 、 $N$ 、 $\lambda$  作为光波导阵列的光波导层厚度、

周期、波导层数和光波长, 并且假设平面单色波入射。

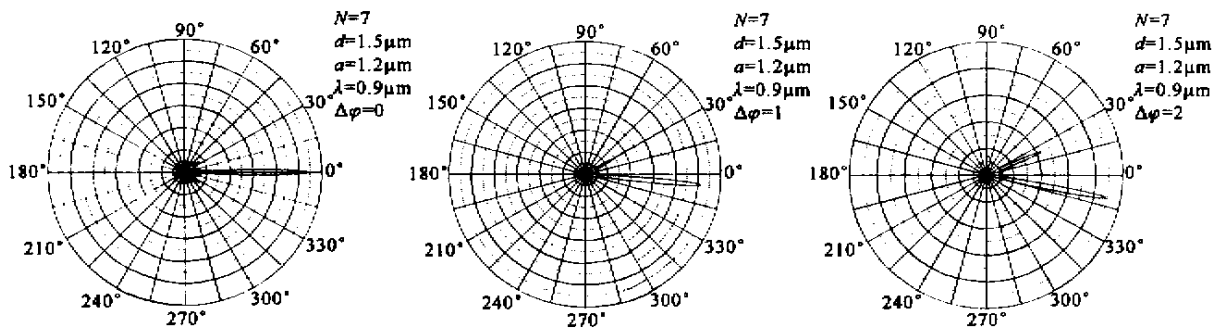


Fig. 5 Fan out of the scanner at  $\Delta\phi_v = 0$ ,  $\Delta\phi_v = 1$ , and  $\Delta\phi_v = 2$

#### 4.1 光波导阵列结构参量对扫描光束空间分布的影响

1) 光波导层数  $N$  对扫描光束空间分布的影响。

图 6 所示为  $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ 、 $d = 1.5 \mu\text{m}$ 、 $a = 1 \mu\text{m}$  时, 对应于  $N = 6$  和  $10$  的相对光强  $I$  的空间分布。

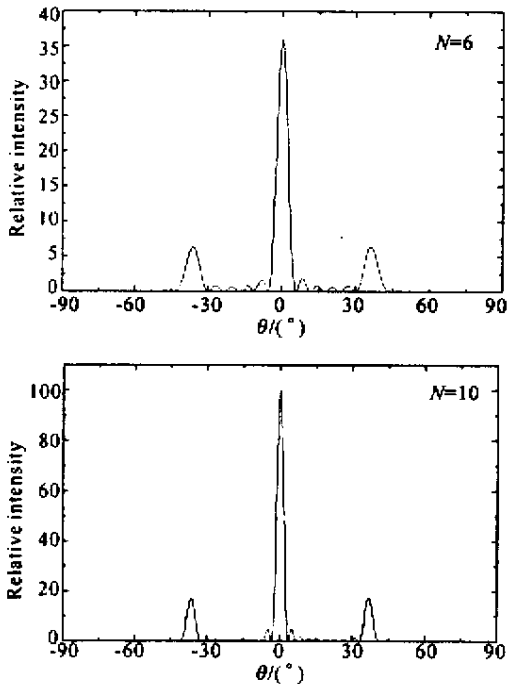


Fig. 6 Spatial distribution of relative intensity at  $N = 6$  and  $N = 10$

由图可见, 光波导层数  $N$  主要影响扫描光束的分辨率:  $N$  越大, 主瓣就越窄, 分辨率越高, 同时能量越集中。所以, 在工艺水平允许的情况下, 应增加波导阵列层数, 以提高分辨率。

2) 波导层厚  $a$ 、周期  $d$  对光场分布的影响

图 7 给出了  $I_1/I_0$  ( $\pm 1$  级边瓣与中央主极大之比) 与  $a/d$  (波导层厚度与周期的比值) 的关系。可见  $a/d$  越大,  $\pm 1$  级边瓣对中央主极大的影响越小。

图 8 为波导层数  $N = 7$ , 波长  $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ , 波导

芯层厚度  $a = 1 \mu\text{m}$  时, 衍射光场相对光强的分布随  $a/d$  的变化。可以看出,  $a/d$  值主要影响光束扫描最大范围, 当  $a$  一定时,  $d$  越小, 扫描范围越大。

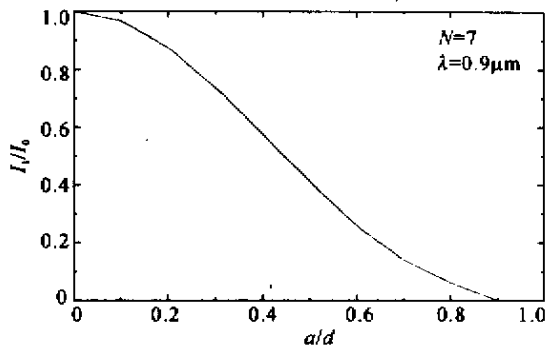


Fig. 7 Ratio of relative intensity  $I_1/I_0$  versus  $a/d$

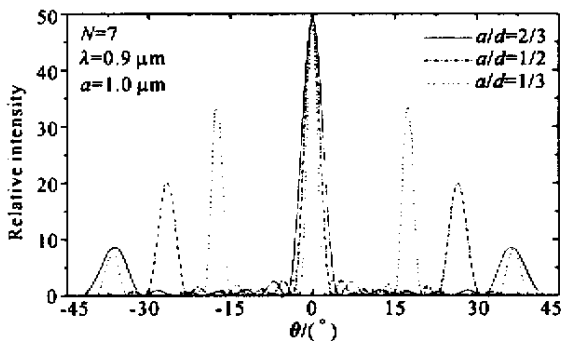


Fig. 8 Spatial distribution of relative intensity at different  $a/d$  with  $a = 1 \mu\text{m}$

图 9 为波导层数  $N = 7$ , 波长  $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ , 光波导阵列周期  $d = 1.5 \mu\text{m}$  时, 输出光相对光强  $I$  的空间分布随  $a/d$  的变化。可以看出, 当  $d$  一定时,  $a$  值越大, 第一级边瓣的能量相对主瓣的能量越小, 即能量向主瓣集中。

#### 4.2 工作波长 $\lambda$ 的选取

波长的选取主要由器件的应用和材料的光损耗决定, 使用的工作波长应保证入射光子能量小于波导芯层晶体的禁带宽度。根据理论分析, 中央零级

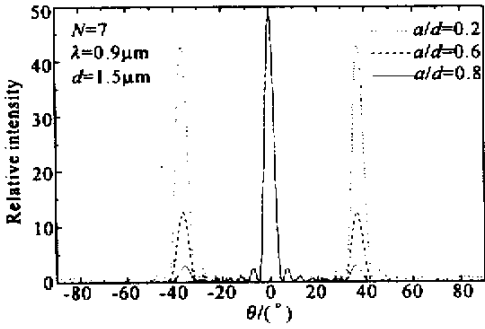


Fig. 9 Spatial distribution of relative intensity  $I$  at different  $a/d$  with  $d = 1.5 \mu\text{m}$

主极大半角宽度  $\Delta\theta = \lambda/Nd\cos\theta$ 、扫描角度范围  $\theta_M = \arcsin(\lambda/d)$  因此  $\lambda$  变大,中央零级主极大光束宽度变宽,同时扫描角度也变宽。图 10 给出了当

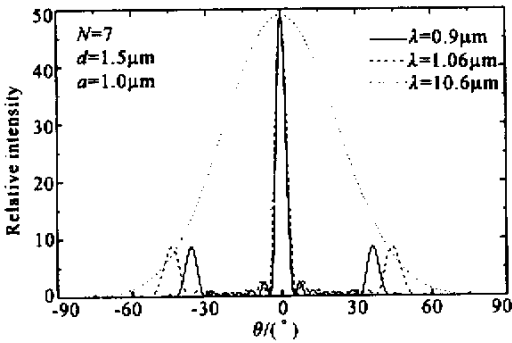


Fig. 10 Spatial distribution of relative intensity  $I$  at different  $\lambda$  with  $a = 1 \mu\text{m}$  and  $d = 1.5 \mu\text{m}$

$\lambda = 0.9 \mu\text{m}, 1.06 \mu\text{m}, 10.6 \mu\text{m}$  时,  $a = 1 \mu\text{m}, d = 1.5 \mu\text{m}, N = 7$  时的光强分布特性。

### 5 实验结果

我们利用金属有机物化学气相沉积设备外延生长了  $N$  为 4,  $L = 0.8 \text{ cm}$  的 AlGaAs 阵列的电光扫描器,并利用  $0.83 \mu\text{m}$  的 LD 激光器对其扫描特性进行了初步实验,实验装置如图 11 所示。

经过实验,得到了如图 12 所示光束偏转的实验结果,证实了这种器件实现快速扫描的可行性。图 12 中的上部光斑为 CCD 相机测得:图 12(a)为未加电压时的输出光斑,图 12(b)为外加电压后的光斑位置。图中下部为对所得光斑灰度通过快速傅里叶平滑后的分布曲线。可见,未加电压时,光斑中心在图中央位置,外加电压后,光斑中心右移至图的右侧。光斑最大偏转角度为  $\Delta\theta_{\text{max}} = 30^\circ$ ,相应的单个波导阵元所加的最大电压  $U_{\text{max}} = 4.6 \text{ V}$ 。

根据理论计算,该光波导阵列的最大偏转(扫描)角度  $\Delta\theta_i = 32^\circ$ ,实测  $\Delta\theta_{\text{max}}$  与  $\Delta\theta_i$  存在差别的主要原因是实验中入射光未能保证垂直入射,致使各波导的相位延迟偏离理论计算值,为了讨论入射光非垂直入射的影响,必须在理论分析中考虑光波导效应。图中的光斑条纹为半导体激光器所发出高阶模所致。

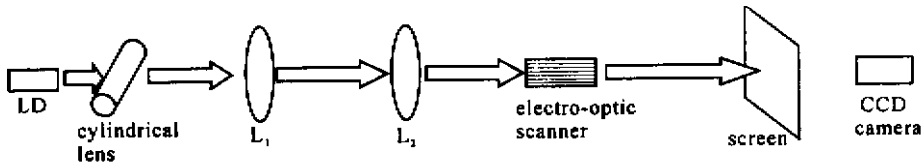


Fig. 11 Experimental system

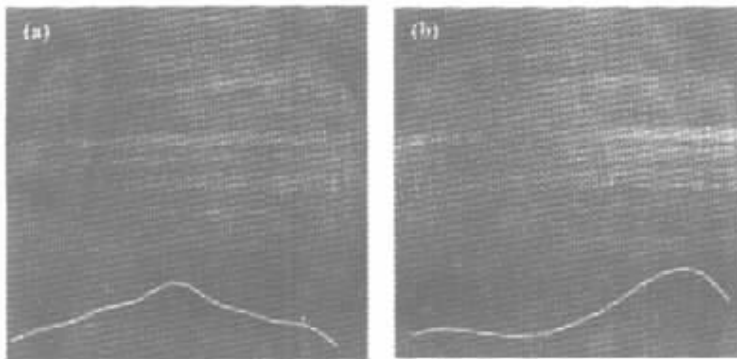


Fig. 12 Output of rapid narrow laser beam electro-optic scanner. (a) Original position of the output light without voltage signal; (b) Moving position of the output light with maximum voltage signal

结论 本文研究了一种新型的光波导阵列电光扫描

器,由理论和实验分析可知:

1) 在低电压控制下,光波导阵列电光扫描器可实现空间激光窄光束扫描,其扫描范围可以超过  $\pm 30^\circ$ ;

2) 光束扫描的偏转角度由波导层上的电压决定,通过程序控制电压可实现光学相控阵。

3) 由于半导体器件的电光响应时间很快(可达  $10^{-11}$  s),可视为瞬时响应,因此,这种扫描器件的扫描速度主要取决于电路特性,很容易实现 1 kHz ~ 10 MHz;

4) 光波导阵列层数  $N$  越大,扫描器件分辨率越高,光波导厚度  $a$  越大,周期  $d$  越小,入射光波长  $\lambda$  越长,则扫描范围越大,扫描光束主瓣越宽; $a/d$  越大则输出光的边瓣强度越小,干扰噪声越小。

有关光波导效应及外加控制电压特性对这种光波导阵列电光扫描器扫描特性的影响,将另行报道。

### 参 考 文 献

- [1] Hobbs R H, Cantor A J, Grantham D H *et al.*. Laser electro-optic phased array devices (LOESPAR). *IEEE Laser and Electro-Optics Society Conf. Proc.*, 1989. 94 ~ 95
- [2] Farina J D, Grasso R, Hobbs R H *et al.*. Two-dimensional scanning with laser electro-optic phased array devices (LEOPARD). *IEEE Laser and Electro-Optics Society Conf. Proc.*, 1989. 95 ~ 96
- [3] Shi Shunxiang, Zhang Haixing, Liu Jingsong. *Physical Optics and Applied Optics* (物理光学与应用光学), Xi'an: Xidian University Press, 2000 (in Chinese).

## A New Type of Rapid Narrow Laser Beam Electro-Optic Scanner

Shi Shunxiang<sup>1)</sup> Li Jiali<sup>1)</sup> Wang Guangsheng<sup>2)</sup> Hua Jizhen<sup>3)</sup>

(<sup>1)</sup>, School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071

(<sup>2)</sup>, China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009

(<sup>3)</sup>, Hebei Semiconductor Research Institute, Ministry of Information Industry, Shijiazhuang 050002)

(Received 15 October 2001; revised 8 January 2002)

**Abstract:** A new type of rapid electro-optic scanner of narrow laser beam is studied. The operation principle of the developed scanning device and the effect of the device structure on the scanning characteristics are analyzed theoretically. The experiment shows that the two-dimensional rapid scanning with wide viewing field of narrow laser beam can be realized by the device with very small control voltage ( $< 10$  V).

**Key words:** laser scanning; optical waveguide array; electro-optic effect