

文章编号 1004-924X(2009)04-0750-07

光电编码器 LED 光源的准直

朱孝立, 陈军宁

(安徽大学 电子科学与技术学院, 安徽 合肥 230039)

摘要: 由于发光二极管(LED)光束的准直度对光电编码器性能影响很大,研究了LED光束的准直特性。分析了光源辐射角对光栅光通量的影响;运用图像旋转理论和频域分析方法,导出了莫尔条纹透光特性函数式,揭示了光源准直度参数对莫尔条纹函数特性的影响。获得了与光束准直度相关的不同透光缝宽度下的莫尔条纹仿真波形,分析了光源准直特性指标对莫尔条纹对比度以及光栅间隙的影响。理论计算结果表明,当透光缝宽度减小 $5\ \mu\text{m}$ 时,莫尔条纹图像的对比度下降17.66%,实验结果与理论仿真波形吻合,表明文中提出的莫尔条纹函数式可为高精度和高可靠性编码器设计和生产提供参考。

关键词: 光电编码器;发光二极管;光束辐射角;光栅;莫尔条纹;仿真

中图分类号: TN762;TN312.8 **文献标识码:** A

Beam collimation of LED in optical encoder

ZHU Xiao-li, CHEN Jun-ning

(School of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei 230001, China)

Abstract: The effect of the collimation degree of light beam of a Light Emitting Diode(LED) on the performance of optical encoders was researched. By analyzing on the impact of radiation angles of a light source on the grating flux, and by applying of a rotation matrix method and frequency-domain analysis, the light distribution function formula of Moiré patterns was deduced and its simulation waveforms with various slit widths were presented. Furthermore, the influences of collimated light source on the contrast ratio of Moiré patterns and the grating gaps were analyzed. The Experimental results indicate that the contrast ratio of Moiré patterns is reduced by 17.66% when the value of slit width is reduced by $5\ \mu\text{m}$, and obtained results is well coincident with the simulation waveforms. Therefore, the proposed Moiré pattern formula relative to the collimation degree is very helpful to the design and production of high quality encoders.

Key words: photoelectric encoder; Light Emitting Diode(LED); light beam half angle; grating; Moiré pattern; simulation

1 引言

光源是光栅传感器或光电旋转编码器内部的一个重要的部件,其性能的优劣直接影响编码器的精度、分辨率和可靠性。近年来,由于受到高速轨道交通、新型采掘设备和施工机械以及武器装备等需求影响,对重载型恶劣环境下高可靠光电旋转编码器的设计提出了更高的要求,这类编码器的关键技术之一是设计和采用照度均匀、准直度高的发光源,以使编码器在保证精度的前提下具有很强的抗振性、宽工作温度范围、较长的使用寿命并能承受较高的轴向和径向力。

激光二极管(Laser Diode, LD)发出的光束虽然具有非常好的准直性,且有在编码器上应用的报道^[1],但是由于其光点面积小、波长选择性强、成本高等限制了其在编码器上的广泛应用,LD更难以适应重载环境的要求。

目前,光电编码器采用的光源基本上是红外发光二极管(Infrared Light Emitting Diode, IR_LED)固态光源,它具有结构简单、可靠性高、成本低的特点^[2-3]。发光二极管(LED)辐射光束准直特性指标用半功率辐射角(θ)表示,即当辐射功率为50%时的发光二极管光束角,简称为辐射角或光束角。实际上,发光二极管辐射光束是呈削锥的球扇形, θ 表示光束偏离光轴的角度, θ 值越小表示光源辐射光束与光轴的平行度越好。

近年来,国外在光电编码器准直光源设计制造上取得很大进步,LED管芯材料由GaAs逐渐转向发光效率更高、频率特性更好的GaAlAs。由于GaAlAs发光效率高,相同的辐射功率下管芯工作电流得以下降,能够减小LED热衰效应,扩大工作温度范围,提高器件可靠性。管芯前端的准直透镜运用CAD优化设计,大量采用非球面和自准直透镜技术,使LED光束准直度做到非常高的水平。例如,日本滨松光电子(Hamamatus)为编码器提供的LED,其辐射角为 $\pm 5^\circ$;美国OPTEK最近也推出型号为OP205CL的GaAlAs材料红外发光二极管,辐射角为 $\pm 3^\circ$ 。此外,LED管芯采用专门的条状管芯,制造时不再采用以往为获得窄光束所使用的电流限制结构(Current Confinement Structure),而是通过增加反射层、侧面发光(ELED)、电极与散热底板共晶焊接等

新工艺,这些措施也提高了LED的可靠性和发光效率^[2]。

国内光栅传感器和光电编码器目前主要使用的发光二极管是美国霍尼维尔(Honeywell)或韩国等地的产品,由于对器件的辐射光束的准直度和均匀性等参数的选择比较随意,制造过程控制不严,造成国产光电编码器精度普遍较低,可靠性不高,产品大多只能在低端应用,而在关键性应用场合仍是国外产品占大多数,这一局面需要改变。

本文推导出与光源准直度参数相关的莫尔条纹函数式,用仿真方法从理论上说明光源准直度指标对莫尔条纹对比度影响,并通过实际测试加以验证,为进一步深入理解光源特性对编码器性能的影响提供了理论依据,可为高精度,高可靠光栅编码器设计制造提供参考。

2 光束准直度对编码器特性的影响

2.1 LED光束准直度对光通量的影响原理

光电编码器是通过记录指示光栅(静光栅)和标尺光栅(动光栅)做相对运动时干涉产生的莫尔条纹数来实现位移或转角检测的。由于长光栅和圆光栅的工作原理基本相同,下面以透射式线性长光栅为例加以讨论。图1是光栅莫尔条纹光强度受光束角影响的示意图^[4],左图显示当码盘转动到应该输出最大光亮度位置时,由于光源光束倾斜,光线在通过光栅副时出现光遮挡,导致光通量下降;而右图表示在码盘到达最小光通量值位置时,由于同样的原因出现不该有的光泄漏,这样必然造成莫尔条纹对比度下降^[5]。

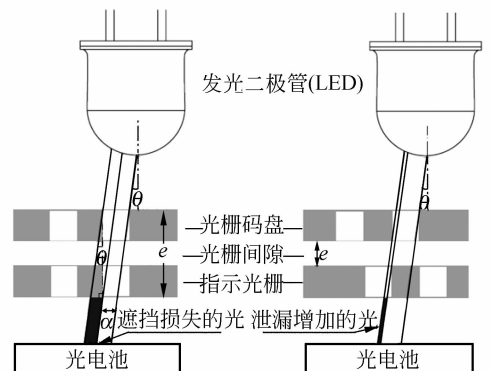


图1 光束辐射角对光栅光通量的影响
Fig. 1 Impact of radiation angle on flux

对于光栅节距为 T , 有效透光缝长为 L , 缝宽为 a 、光栅间隙为 e 的一组光栅副, 在光强度为 E 的 LED 光源作用下, 到达光电池表面的光通量为 $\Delta\Phi$, 则:

$$\Delta\Phi = E \cdot n \cdot ds' = E \cdot n \cdot L \cdot da', \quad (1)$$

这里, 光源为朗伯 (Lambert) 光源, a' 为光栅光缝 a 在辐射角为 θ 光束照射下经过指示光栅后到达光电池表面的投影光束实际宽度, n 为接收窗口内光栅线的有效线数, 参见图 1, 不难得到:

$$a' = a - e \cdot \tan \theta, \quad (2)$$

当光强度一定时, 光电池输出的光电流 I_{sc} 与光通量 $\Delta\Phi$ 大小成正比, 即:

$$I_{sc} \propto \Delta\Phi,$$

所以, 当辐射角 θ 增大或光栅间隙 e 增大时, 输出的光电流将减小, 负载的共模干扰增大, 导致莫尔条纹信号变形和漂移, 严重时将完全失去对信号的检测。如果是空间频率高的光栅系统, 上述影响将更加明显。

上面的推导忽略了光栅条或码盘的厚度, 实际上金属码盘厚度通常比光栅节距大, 一般在 $70 \mu\text{m}$ 左右, 所以, 当一定辐射角的入射光束照射到码盘光缝的垂直面时必然存在反射现象, 这些反射光作用于光电管将使莫尔条纹信号对比度进一步下降。因此, 如果运行环境许可, 编码器应尽量用聚酯码盘或玻璃码盘以获得较高的信号对比度。

2.2 光源准直特性与莫尔条纹函数关系推导和仿真

为了得到光源准直特性参数 (光束辐射角) 对莫尔条纹对比度影响的定量关系, 必须推导出包含光源准直特性参数的莫尔条纹的函数关系式。

设黑白透射光栅透光缝 (白线) 宽为 a , 遮光栅线 (黑线) 宽为 b , 光栅节距 (周期) 为 T , 则有 $T = a + b$, 设光缝的透光率为 100% (即为 1) 黑线透光率为 0, 光栅函数可以表示为下面的单位脉冲周期函数:

$$y(x) = \begin{cases} 1, & kT - \frac{a}{2} \leq x \leq kT + \frac{a}{2} \\ 0, & kT + \frac{a}{2} \leq x < (k+1)T - \frac{a}{2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, k 为整数。

从信号处理的角度, 把式 (3) 的函数用正交的傅里叶级数形式表示^[3], 将光栅函数设定为偶函数, 于是有:

$$y(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n\omega x), \quad (4)$$

求得的傅里叶系数为:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) dx = \frac{a}{T},$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(x) \cos(n\omega x) dx = \frac{2a}{T} \text{sinc}\left(\frac{na}{T}\right),$$

代入式 (4), 即得标准的反映光栅透光特性的光栅函数表达式:

$$y(x) = \frac{a}{T} + \frac{2a}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{na}{T}\right) \cdot \cos(n\omega x), \quad (5)$$

其中, 角频率 $\omega = \frac{2\pi}{T}$, n 为谐波次数, $\text{sinc}\left(\frac{na}{T}\right) = \text{sin}\left(\frac{n\pi a}{T}\right) / \frac{n\pi a}{T}$ 为采样函数, 代表光栅衍射幅度因子。

这里, 仅讨论大多数情况下相同周期的两个光栅作用时的情形。根据光栅作用原理, 不难把莫尔条纹理解为在辐射角为 θ 的光源照射下, 节距为 T 的光栅与相同规格旋转 γ 角的光栅投影产生干涉效应^[7]。参照式 (5), 给出在旋转 γ 角的坐标系下光栅投影透光函数表达式:

$$y'(x) = \frac{a'}{T} + \frac{2a'}{T} \sum_{m=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{ma'}{T}\right) \cdot \cos(m\omega x'), \quad (6)$$

式中, m 表示构成投影函数的谐波次数, a' 在采用理想的准直 LED 作为光源时, 有 $a' = a$, 而在通常情况下, $a' \leq a$ 。

根据图像旋转理论, 光栅旋转 γ 后, 其投影函数的坐标经由图像旋转变换矩阵得到下面关系^[8]:

$$\begin{cases} x' = x \cos \gamma + y \sin \gamma \\ y' = y \cos \gamma - x \sin \gamma \end{cases}, \quad (7)$$

将式 (7) 的新坐标函数带入式 (6) 并化简, 这里令 $y = y'(x)$, 得到光栅投影的透光函数表达式:

$$y'(x) = \frac{a'}{T \cos \gamma} + \frac{2a'}{T \cos \gamma} \times \sum_{m=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{ma'}{T}\right) \cdot \cos\{m\omega [x \cos \gamma + y'(x) \sin \gamma]\} + x \tan \gamma, \quad (8)$$

式(8)是一个比较复杂的多值隐函数,且不能够化成显函数形式。为了能够实现对上述莫尔条纹函数的计算机编程和仿真模拟,必须对 $y'(x)$ 做降次处理,本文运用 MATLAB 的“ezplot”函数首先画出 $y'(x)$ 的函数图形,再获取其图形对象句柄,结合曲线拟合工具箱得到 $y'(x)$ 的降次拟合函数:

$$y'(x) \approx \frac{a'}{T \cos 1.419\sqrt{\gamma}} + \frac{2a'}{T \cos 1.419\sqrt{\gamma}} \times \sum_{m=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{ma'}{T}\right) \cdot \cos\{m\omega[x\cos(1.419\sqrt{\gamma}) + y_{m-1}'(x)\sin(1.419\sqrt{\gamma})] + \frac{\pi}{20}\} + x \tan(1.419\sqrt{\gamma}), \quad (9)$$

已知,莫尔条纹的透光函数 $M(x)$ 是式(4)和式(9)两个函数的乘积,即:

$$\begin{cases} M(x) = y(x) \cdot y'(x) = \left[\frac{a \tan(1.419\sqrt{\gamma})}{T} + \frac{2a \tan(1.419\sqrt{\gamma})}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{na}{T}\right) \cdot \cos(n\omega x) \right] x + \frac{aa'}{T^2 \cos(1.419\sqrt{\gamma})} + & \text{A 项} \\ \frac{2aa'}{T^2 \cos(1.419\sqrt{\gamma})} \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{na}{T}\right) \cdot \cos(n\omega x) + & \text{B 项} \\ \frac{2aa'}{T^2 \cos(1.419\sqrt{\gamma})} \sum_{m=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{ma'}{T}\right) \cdot \cos\left\{m\omega[x\cos(1.419\sqrt{\gamma}) + y_{m-1}'(x)\sin(1.419\sqrt{\gamma})] + \frac{\pi}{20}\right\} + & \text{C 项} \\ \frac{4aa'}{T^2 \cos(1.419\sqrt{\gamma})} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{na}{T}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{ma'}{T}\right) \cdot \cos(n\omega x) \cdot \cos\left\{m\omega[x\cos(1.419\sqrt{\gamma}) + y_{m-1}'(x)\sin(1.419\sqrt{\gamma})] + \frac{\pi}{20}\right\} & \text{D 项} \end{cases} \quad (10)$$

莫尔条纹函数式展开后由 4 部分和构成,即莫尔条纹交流信号(D 项)、带有一定交变斜率的直流信号(A 项)和两个光栅彼此乘上对方栅空比的原函数(B、C 项),相对于莫尔条纹函数 $M(x)$, B、C 项属于高频信号,可以通过滤波去除。A 项反映了莫尔条纹的方向,由于只涉及莫尔条纹对比度的计算,取其直流分量,考虑到莫尔条纹主要是同频干涉,可令 $m=n$,因此,上面的莫尔条纹函数可以简化为:

$$\begin{aligned} \widetilde{M}(x) \approx & \frac{aa'}{T^2 \cos(1.419\sqrt{\gamma})} + \frac{4aa'}{T^2 \cos(1.419\sqrt{\gamma})} \times \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{na}{T}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{na'}{T}\right) \cdot \cos(n\omega x) \times \\ & \cos\{m\omega[x\cos(1.419\sqrt{\gamma}) + \\ & y_{m-1}'(x)\sin(1.419\sqrt{\gamma})] + \frac{\pi}{20}\}, \quad (11) \end{aligned}$$

式(11)是通过计算机拟合仿真得到的光栅莫尔条纹函数一般表达式,考察式(11)可以发现,反映光源准直度特性指标的 a 和 a' 在公式中,而且由于式(11)是一个降阶的累加代数式,容易通过计算机编程获得莫尔条纹的仿真图像。该式也为深入研究光栅莫尔条纹其他特征提供了重要的参考函数模型。

2.3 光源准直特性对莫尔条纹对比度影响分析

莫尔条纹的对比度是衡量图像质量的重要指标,它的好坏直接影响光电编码器的检测精度和电路细分精度^[6],对比度可以表示为:

$$C = \frac{|A_{\max}|}{|A_{\min}|}, \quad (12)$$

式中, A_{\max} 、 A_{\min} 分别表示信号的最大和最小幅值。

这里,分别取 $a_1 = a_2 = 0.02 \text{ mm}$, $T=0.04 \text{ mm}$ 的光栅和 $a_1=0.02 \text{ mm}$, $a_2=0.015 \text{ mm}$, $T=0.04$ 的光栅参数代入式(11),取光栅的夹角 $\gamma=1^\circ$,用 MATLAB 工具得到两种光栅参数

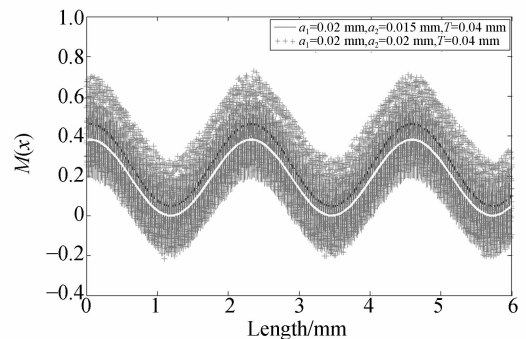


图 2 不同光源辐射角下莫尔条纹的仿真波形
Fig. 2 Simulation waveform of Moiré patterns

下的莫尔条纹仿真图像,见图 2 所示。图中,星点构成的淡色余弦函数包络是理想准直光源下输出的光栅莫尔条纹;竖线构成的深色余弦函数包络是由于光源辐射角引起的光通量变化(a' 由 0.02 mm 减小到 0.015 mm)产生的莫尔条纹,比较两种状态输出图形,显然后者波形幅度明显下降,表明对比度降低。

设辐射角改变前后的莫尔条纹的对比度分别为 C_1 和 C_2 ,运用 MATAB 提供的 max 和 min 函数,对上面的两种莫尔条纹的对比度分别计算,得到:

$$C_1 = \frac{|0.7277|}{|-0.2145|} = 3.3933,$$

$$C_2 = \frac{|0.5994|}{|-0.2145|} = 2.7939.$$

即当 LED 光源的辐射角增大,光束准直度下降,使得光栅的透光缝宽度由 0.02 mm 降为 0.015 mm 时,即 a' 减少 5 μm ,对应莫尔条纹图像的对比度将下降 17.66%,从而在理论上证明了光源辐射角对莫尔条纹信号的幅度和对比度影响,并与先前的实验结论相吻合^[10]。

对比度下降必然会引起光电编码器波形的共模信号分量增加,整形后的信号占空比偏移 0.5 的最优值,对细分精度造成不利的影 响,带来误差。

图 3 是把图 2 中的莫尔条纹包络取平均值得到的透光曲线图,从图 3 可以看出,经过整形后得到的脉冲占空比由于对比度的下降而发生改变,从而影响了细分精度,严重时光电编码器将不能输出脉冲。

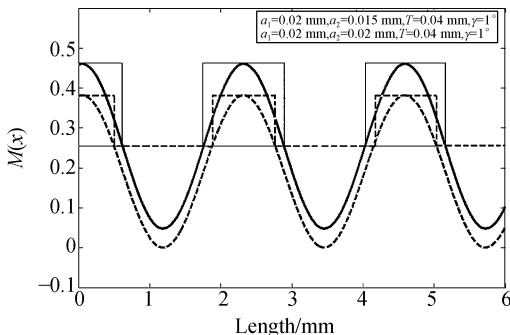


图 3 不同辐射角的莫尔条纹波形对应脉冲占空比
Fig. 3 Waveform of Moiré pattern in different radiation angles and their pulse duties

3 实验与讨论

在位移控制分辨率为 0.01 mm 光栅实验台上,对 Encodertech 公司的 LAM500CPI-6T 编码器模块样品和 Agilent 公司的 HEDS-9140A00 编码器模块进行了实际测试。

图 4 是 LAM500CPI-6T 的光电二极管阵列输出信号的示波器输出波形,图中显示的是光电信号未经放大和整形处理前莫尔条纹的电流波形,波形的包络形态与图 3 仿真的结果十分相似。在图 4 中,位于下面的波形是光栅间隙为 0.5 mm 时的电流波形,上面的波形是光栅间隙增大到 1.7 mm 时的波形,可以看到当光栅间隙发生较大变化时波形的幅度变化很小,说明该型号编码器内部红外发光二极管(IR_LED)具有非常好的光束准直特性。

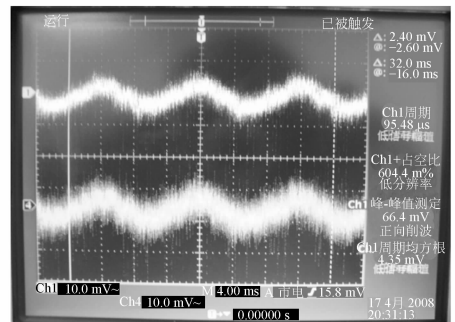


图 4 示波器实测莫尔条纹光电输出信号波形
Fig. 4 Waveform of Moiré by oscillograph

表 1 显示的是一款 HEDS-9140A00 编码器模块在不同间距条件下输出的信号占空比结果。不难理解,在一定辐射角的光源下,光栅的间距变化可以等效为间距固定时光源辐射角发生改变,因此,表 1 的测试结果同样说明辐射角变化将影响整形后脉冲信号的占空比大小(*号栏表示脉冲出现输出不稳定)。

表1 光栅间隙对应信号相位差值实测数据表

Tab.1 Measurement results of signal phase differences of grating gaps

光栅间隙(mm)	AB 相位差(°)
0.3	88.73
0.6	88.53
0.9	87.36
1.2	86.02
1.5	85.70
1.8	84.00
2.1*	82.08

测试表明,当光栅间隙增大时,编码器虽然仍可以输出矩形波信号,但是信号的相位差随着光栅间隙的增大发生改变,它将明显影响光电编码器检测精度,使用中需要引起注意。不过,对于采用浮动式长光栅带工作的设备,如喷绘机、写真机等,较大的光栅间隙宽容度(对应的是较小的LED光源辐射角)对设备可靠工作十分有利。

4 结 论

光电编码器需要尽量采用辐射角小、辐射度均匀的LED作为光源,辐射角越大表明光束的准

直性越差,其产生的莫尔条纹信号波形的正弦性、正交性变差,信号对比度将随之减小,从而造成编码器检测误差,严重时编码器将无法正常工作。

本文通过导出莫尔条纹函数方程,揭示了光源准直度参数对莫尔条纹函数特性的影响,从理论上给出了光源准直特性对莫尔条纹对比度的影响量化结果。理论计算表明透光缝宽度 a' 下降 $5\mu\text{m}$,莫尔条纹对比度减小约17%。该莫尔条纹函数式可为光栅莫尔条纹其他相关研究提供了参考。

最后的实验结果证明了光源准直度对莫尔条纹图像的对比度影响,准直度不好的光源会对光电编码器精度、可靠性等都会产生不利影响。这对应用在石油钻采设备、轨道交通设备、汽车传感器以及武器装备等重载条件和恶劣环境下的编码器尤其关键。从编码器装配生产角度看,采用准直光源的编码器可以允许有相对较大的装配误差和光栅间隙误差宽容度,对于喷绘机、写真机等大量程光栅检测系统可靠工作非常必要。另外,由于准直光源作用下光栅干涉的莫尔条纹信号的振幅大且正弦性好,也能保证后续有较高的细分精度。

参考文献:

- [1] ZHANG J H, CAI L L. Autofocus laser rotary encoder [J]. *Applied Optics*, 1998, 37 (13): 2691-2692.
- [2] 屠大维,吴仍茂,杨恒亮,等. LED封装光学结构对光强分布的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 832-837.
TU D W, WU R M, YANG H L, *et al.*. Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 832-837. (in Chinese)
- [3] YUJI M, TETSUYA S, TOUR Y. Optimizing design of high-resolution optical encoder using a point-source light-emitting diode [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(1): 013609-1-7.
- [4] HAMAMATSU P K K. Solid State Division. Technical information- LED, 2001.
- [5] ODED K, ILANA G. *The Physics of Moire Metrology* [M]. Wiley-Interscience Publication, 1990: 90-93.
- [6] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都:四川科学技术出版社, 2003.
YE SH X. *The Photoelectric Technology of Precise Measuring Displacement* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [7] 张善锺. 计量光栅技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.
ZHANG SH ZH. *The Technology of Metrology Grating* [M]. Beijing: China Machine Press, 1985. (in Chinese)
- [8] 郑方,张毓晋. 数字信号与图像处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
ZHENG F, ZHANG Y J. *The Digital Signal and Image Processing* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [9] 朱应时,杨进堂. 园光栅的高精度高质量莫尔条纹信号的研究[J]. *计量学报*, 1995, 16(4): 280-285.
ZHU Y SH, YANG J T. Study of Moire fringe sig-

nals with high accuracy and superior qualith in radial gratings[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, 16(4): 280-285. (in Chinese)

- [10] MAATSUZOE Y, NOBUHIKO T. Breadboard system and techniques to optimize the optical system of an encoder[J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40(2):

283-288.

- [11] LUTENBERG A, PEREZ QUINTIAN F, REBOLLO M A. Study of a new design of an incremental optical encoder [J]. *SPIE*, 2006, 6292: 1-10.

作者简介:



朱孝立(1962—),男,副教授、博士研究生,主要研究方向为传感器和信号处理。E-mail:zxl@mail.hf.ah.cn



陈军宁(1953—),博士,教授,博士生导师,主要研究方向为超大规模集成电路设计和微电子器件模拟与建模。E-mail:jnchen@ahu.edu.cn

● 下期预告

外腔型 YVO₄ 拉曼激光器

胡大伟^{1,2}, 王正平¹, 张怀金¹, 程秀凤¹,
于浩海¹, 许心光¹, 王继扬¹, 邵宗书¹

- (1. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100;
2. 山东大学 国防科学技术研究院, 山东 济南 250100)

为了实现新波长、高效率的激光输出,建立了外腔型拉曼实验装置并对 YVO₄ 晶体进行了测量。方法:采用提拉法生长了高光学质量的 YVO₄ 晶体,最大尺寸为 $\phi 28 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,质量 126 g。以脉冲宽度为 40 Ps 的 Nd:YAG 锁模激光器作为激发源,研究了 YVO₄ 晶体的外腔拉曼输出特性:结果:多波长输出的总转换效率达到 51.4%,最大输出能量 2.21 mJ;1 175 nm 一级斯托克斯拉曼输出的最高转换效率为 32%,最大输出能量 0.57 mJ;1 325 nm 二级斯托克斯拉曼输出的最高转换效率为 12.3%,最大输出能量 0.36 mJ。结论:上述结果表明,采用外腔型结构可使 YVO₄ 晶体的拉曼输出性能显著提高。