

用于空间频谱分析的楔、环阵列探测器的研制和特性

赵焕卿 杜元成 赵在忠 章志鸣

(复旦大学物理系激光物理研究室)

提 要

在混合型频谱分析系统中,楔、环阵列探测器可用作光学系统和电子系统之间的连接器件,对光信号采样后输入计算机处理。我们的实验室设计和研制的这种探测器具有32个半圆环状探测器以检测径向信号,32个楔形探测器以检测方位信号。该探测器在一块直径约32mm的硅片上制成,采用控制扩散过程以获得均匀的响应率和灵敏度。楔形探测器和与楔形探测器面积相当的半圆环探测器的平均响应率约为0.5mA/mW,时间常数约为150 μ s。若用焦距为240mm的变换透镜,光源为6328 \AA 的氦氖激光时,空间频率带宽可高达100周。

在光学信息处理系统的研究中,光学-计算机组合的混合型系统具有极大的应用潜力和发展前途。其中最为简单又较为成熟的是混合型光学频谱分析系统(OPSA),这种系统能用于对图片的快速分类、识别和筛选等处理。美国的ROSA(Recording Power Spectrum Analysis)^[1]系统便是属于这种类型的。光电阵列探测器是连接光学系统和计算机系统之间的关键性元件,本文就这种探测器的有关设计考虑和研制的结果作一简单介绍。

一、空间频谱分析的基本原理

由准直的氦-氖激光束照明记录有关图象的幻灯片,经透镜的傅里叶变换后在透镜的后焦面上形成光学功率频谱。光电阵列探测器可将该频谱进行采样检测,并经放大和多路开

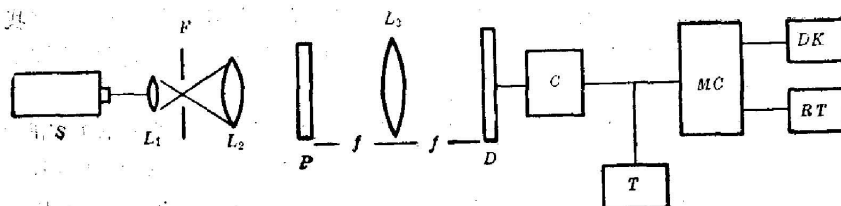


图1 光学-数字混合型频谱分析系统示意图

S—氦氖激光器; P—光学图象; T—磁带机; L_1 —扩束透镜; L_3 —变换透镜; MC—电子计算机;
 F_1 —小孔滤波器; D—阵列探测器; DK—磁盘; L_2 —准直透镜; C—电子系统; RT—显示设备

Fig. 1. Schematic diagram of optical/digital hybrid spectrum analysis system

S—He-Ne laser; P—optical image pattern; T—tape recorder; L_1 —expanding beam lens;
 L_3 —Fourier transform lens; MC—electronic computer; F_1 —pin-hole filter; D—array detector;
DK—magnetic disc; L_2 —collimating lens; C—electronic system; RT—display equipment

关及模数转换后馈入计算机系统按事先给定的程序进行分类、识别等运算。图 1 是典型的光学-计算机混合系统的示意图。

各种不同的物体都有它们自己的特征频谱^[2],正是这种特征频谱使人们利用频谱分析的方法对物体进行识别成为可能。

二、光电阵列探测器的设计依据

光电阵列探测器的设计是以光学中的衍射原理为基础的。我们知道,一定孔径的夫琅和费衍射图样,就是该孔径的透射函数 $t(x, y)$ 的两维傅里叶变换^[3]:

$$T(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy,$$

式中 f_x, f_y 分别为 x 方向和 y 方向上的空间频率。此外,根据傅里叶光学中的相移定理:

$$\mathcal{F}\{g(x-a, y-b)\} = G(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(f_x a + f_y b)].$$

可见,除线性相移因子外,任一函数的傅里叶变换与该函数在空间域中的位移无关。式中 $\mathcal{F}\{g(x-a, y-b)\}$ 表示作傅里叶变换; a, b 分别为函数在空间域中沿 x 方向和 y 方向的位移; $G(f_x, f_y)$ 为 $g(x, y)$ 的频谱。由于探测器检测的是功率谱,位相因子不起作用;光学图象是具有实数的函数,其功率谱必然是中心对称的,即

$$|T(f_x, f_y)|^2 = |T(-f_x, -f_y)|^2.$$

傅里叶光学中的相似定理告诉我们,空间域中坐标 (x, y) 的“伸展”,将导致频率域中坐标 (f_x, f_y) 的压缩,即

$$\mathcal{F}\{g(ax, by)\} = \frac{1}{|ab|} G\left(\frac{f_x}{a}, \frac{f_y}{b}\right).$$

所以光学图象在某一方向上的线度愈大,则在频率域中其对应方向上的线度也愈小;反之亦然。最后,考虑到对功率频谱的采样和电子计算机对二进制的要求,光电阵列探测器可由 64 个硅光电二极管在同一块硅片上融合成一体构成。在这 64 个阵列探测中,32 个为半圆形的环状结构;另外 32 个为扇形的楔状结构。它们分别对整个频谱中的径向分布和不同方位分布的功率密度进行采样和检测。若在阵列探测器的平面上采用极坐标,则在第 i 个半圆环探测器上测得的总功率为

$$R_i = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_i+\Delta r} I(r, \theta) r dr d\theta \quad (i=1, 2, \dots, 32),$$

式中 $r = (\xi^2 + \eta^2)^{1/2}$, $\theta = \text{tg}^{-1}(\eta/\xi)$, Δr 为第 i 个半圆环的宽度。同样,在第 i 个楔形探测器上的总功率为

$$W_i = \int_0^{r_{\max}} \int_{\theta_i}^{\theta_i+\Delta\theta} I(r, \theta) r dr d\theta \quad (i=1, 2, \dots, 32).$$

在我们的设计中,64 个探测器在一块直径为 $\phi = 40$ mm 以上的硅片上制成。其中每个楔状探测器的张角为 5.5° ;半圆环状探测器在中心部分的环宽为 0.16 mm;中间部分的环宽为 0.32~0.63 mm;边缘部分的环宽为 0.95~1.27 mm。这是考虑到一般图象的频谱比较集中地在较低的频率区间内,所以低频部分的环宽比高频部分的环宽要窄得多。此外,为了防止载流子的复合而降低其光敏性能,在每个环的中央还布置有与电极引线相连的铝线,

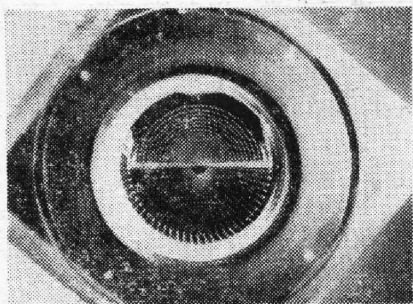


图2 楔环阵列探测器的实物图
Fig. 2 Picture of wedge-ring array-detector

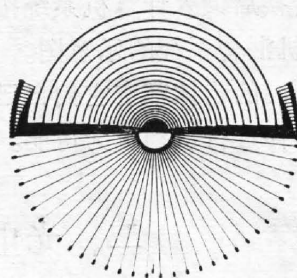


图3 导电铝线、电极和引线分布
(尺寸和实物相同)

Fig. 3 Picture of distribution pattern of Al conducting threads, electrodes and leads on the array-detector (the size is the same as the real parts)

铝线的宽度因环宽而异。楔状探测器的引线比较简单,而环状探测器的引线则比较复杂。设计中可使半圆环两侧留有张角为 6° 左右的楔形间隙,各环和电极间的引线便从这个间隙中引出。为了缩短引线长度,环状探测器的电极间距相互靠得很近,这给焊接带来了一定的困难。图2是实物图,图3是铝线和电极分布图。

阵列探测器的制备与一般集成电路的工艺相似,但考虑到要在大面积的硅片上制作包括电极和引线在内的64个光敏二极管,而且要求它们都有光敏功能和均匀性,除对硅片的尺寸和质量有一定的要求外,我们还采用了高阻 N 型 $10\ \Omega\cdot\text{cm}\langle 100\rangle$ 硅单晶作为基底材料,并在扩散时采用氮化硼源。由于光刻等工艺的要求比较高,所以需要不断地摸索经验才能获得满意的结果。在研制过程中,我们曾采用两种不同质量的硅片和工艺,最终发现它们的光敏性能的均匀性和响应率均有较大的差异。

三、光电阵列探测器的特性和测量结果

应用于频谱分析的阵列探测器具有下列一些指标和特性,我们对所研制的64元阵列探测器作了初步测量。

1. 空间频宽

这是在设计时就确定了的。我们所研制的阵列探测器,其有效直径为 $31.64\ \text{mm}$ (不计电极长度和引线占有的区间)。若采用焦距 $f=240\ \text{mm}$ 的透镜,光源为氦氖激光时,则其最大的空间频率为100周,中心部分的分辨率为每环1周;中间部分为每环 $2\sim 4$ 周;边缘部分为每环 $6\sim 8$ 周。但由于各探测器之间有绝缘层,各环中央又有导电铝线,所以实际的空间频率小于设计值。

2. 伏-安特性

我们对研制的楔环阵列探测器分别用不同功率的激光束照射,在不同的偏压下测得其不同的光电流,从而得到一组伏-安特性曲线。图4是第14个楔状探测器,即F14的伏-安特性曲线;图5是第24个环状探测器,即R24的伏-安特性曲线,偏压在 $-10\ \text{V}$ 内不会击穿。

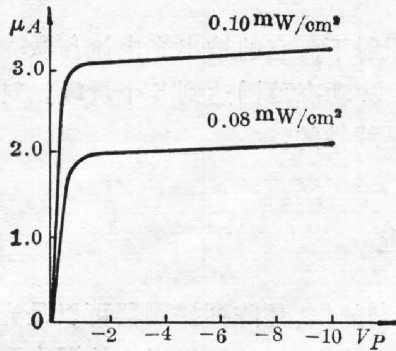


图4 F14的伏-安特性曲线

Fig. 4 Voltage-ampere curves of wedge F14

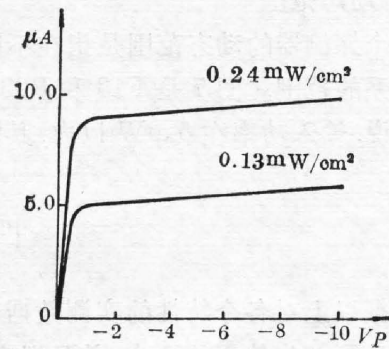


图5 R24的伏-安特性曲线

Fig. 5 Voltage-ampere curves of ring R24

3. 响应率

楔形探测器的面积都是相同的,所以它们的响应率差不多都在 0.5 mA/mW 左右。但环状探测器的响应率因面积的不同而不同,面积愈大,则响应率愈小,这主要是载流子复合增加之故,所以环状探测器的响应率大约从 0.3 mA/mW 到 30 mA/mW 。特别是中心附近的几环,面积很小,因此对响应率计算所引起的误差将会很大,而且有较大的起伏。但环状面积和楔状面积相当的探测器,例如 F13 和 R23,它们的响应率均在 0.5 mA/mW 左右,这表明在制备楔环阵列探测器方面的工艺已达到具有相当稳定的光敏性。在以上响应率的测量中,偏压均固定在 -5V 。

4. 噪声电流

噪声电流即暗电流,楔状探测器的噪声电流均在 $0.1 \mu\text{A}$ 左右,但环状探测器的噪声电流同样随探测器面积的增大而增大,其值约从 $0.1 \mu\text{A}$ 到 $1.0 \mu\text{A}$ 。

5. 响应时间

响应时间等同于采样时间。楔状探测器的响应时间约在 $100 \mu\text{s}$ 左右;环状探测器的响应时间约从 $20 \mu\text{s}$ 到 $200 \mu\text{s}$,其值也和探测器的面积有关。因此采样速率至少每秒可达 5×10^3 次。图 6 是 R31 的响应时间测量波形图。

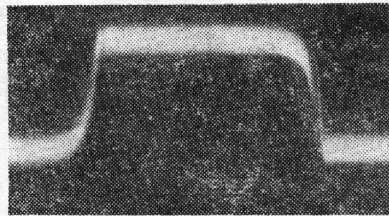


图6 R31的响应时间测量波形图

Fig. 6 Oscillographic display of time response curve of R31

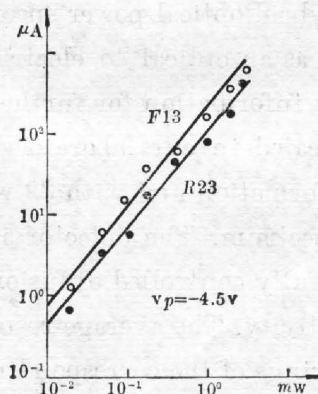


图7 F13和R23的动态范围曲线

Fig. 7 Dynamic range curves of responsibility for F13 and R23

6. 动态范围

一个探测器的动态范围是指在不同激光功率的照射下, 它的输出光电流与激光功率成线性关系的范围。图 7 是 F13 和 R23 的动态范围曲线, 动态范围达到 3 个量级。对 F13 和 R23 来说, 输入功率在 5 mW 以内, 其输出电流至少是线性的。

四、结 论

根据以上对各个特性的实测数据表明, 我们所研制的楔、环阵列探测器可以是光学频谱分析中达到初步使用的要求, 并且把它应用于我校研制的光学-计算机组合的混合型频谱分析系统中。为了改善它的结构, 将采用双层布线, 并进一步提高它的均匀性。

本工作得到贾玉润、滕怀流、罗志钦、张敏芬和郭予其等同志的帮助, 在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] H. L. Kasdan; *Proc. SPIE*, Vol. 117, 1977 (August 23~24), 67.
- [2] G. G. Lendaris, G. L. Stanley; *Proc. IEEE*, 1970, **55**, No. 2 (Feb), 189.
- [3] J. W. Goodman; *«Introduction to Fourier Optics»* (McGraw-Hill, 1968).

The design and fabrication of wedge-ring detectors for optical power spectrum analysis

ZHAO HUANQING DU YUANCHENG ZHAO ZAIZHONG AND ZHANG ZHIMING

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

(Received 9 September 1981)

Abstract

In hybrid optical power spectrum analysis systems, the wedge-ring array detector functions as an optical to electrical interface device for sampling the optical spatial frequency information for further processing by digit computer. The detector designed and fabricated in our laboratory consists of 32 semi-circular rings for detecting the radial information and with 32 wedge-shaped sections for the directional information in the spectrum. The detector is made on a silicon wafer diameter is about 32 mm with carefully controlled diffusion process in order to obtain uniformity in response and sensitivity. The average responsibility is about 0.5 mA/mW for the wedges and annular rings of the corresponding areas, the time constant is about 150 μ s. The spatial bandwidth could be up to 100 cycles with an optical transform lens of 240 mm focal length irradiated by the He-Ne radiation of 6328 \AA .