

近红外共焦球面扫描干涉仪

袁 树 忠

(南开大学现代光学研究所)

提 要

本文描述了用于近红外(0.85 μm 、1.3 μm)的共焦球面腔结构的扫描干涉仪。1.3 μm 的共焦球面扫描干涉仪的自由光谱区为4.3 GHz、分辨带宽达36 MHz(精细常数达120)。

1968年 Hercher 对共焦球面扫描干涉仪作了全面描述^[1]之后,在可见光范围内,国内外都有了商品仪器。这种仪器结构简单、加工制造比较容易,使用方便,是分析可见激光器(He-Ne, Ar⁺等)模式结构的理想仪器。而在半导体激光器的研究中,特别是在光纤通信研究中,急需要对半导体激光器的模谱进行测量分析。

本文报道研制用于半导体激光器(0.85 μm 、1.3 μm)模谱分析的共焦球面扫描干涉仪。分辨带宽优于50 MHz,高达36 MHz;精细常数90,高达120。提供给清华大学等单位使用。满足了他们研制窄线宽单模半导体激光器,分析模谱结构的需要。同时也能用来分析0.85 μm 和1.3 μm 附近光谱的超精细结构。

一、仪器原理和性能参数

共焦球面扫描干涉仪属于 Fabry-Pérot 干涉仪。它是由两个曲率半径相等,镀以高反射率膜层的球面镜组成。两反射镜之间的距离 L 等于曲率半径 r , 构成一个共焦光学系统。其简单光路如图 1 所示。当波长为 λ 的近轴光线入射到干涉仪内时,在忽略球差的情况下,光线在腔内反射,走一闭合路线,即光线在腔内往返四次后又回到重新入射,它们的光程差是 $\Delta = 4nL$ 。根据等倾干涉的亮纹条件,透过共焦球面扫描干涉仪的光的波长,应满足公式

$$4nL = m\lambda, \quad (1)$$

式中 n 是腔内折射率, L 是镜间距离(等于曲率半径 r), m 是干涉级次。

从(1)式可看出,改变折射率 n 或镜间距离 L 就可实现光谱扫描。采用在压电陶瓷上加锯齿波电压,以均匀地驱动一个镜片使其在轴向作微小振动(改变镜间距离),实现光谱扫描。

在扫描干涉仪中,有自由光谱区和分辨带宽(精细常数)两个重要的性能参数。

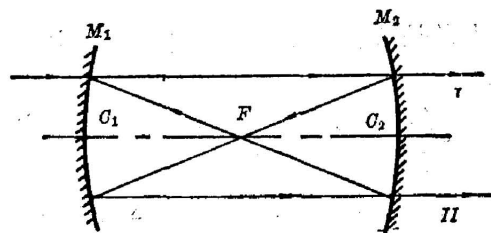


Fig. 1 Path of confocal interferometer

1. 自由光谱区

根据方程(1),当反射镜间隔变化 $(\lambda/4n)$ 时,干涉图形改变一个干涉级次,这时输出波长的变化范围是

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{4nL}, \quad (2)$$

或用频率 ν 表示

$$\Delta\nu = \frac{c}{4nL}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda$ 、 $\Delta\nu$ 就是干涉仪的自由光谱区。在扫描干涉仪中,通常用 $\Delta\nu$ 表示。在空气中 $n \approx 1$, $\Delta\nu$ 则取决于 L 的大小。它表征了当改变 L 使得干涉图形变化一个级次时,干涉仪输出所包括的光谱区域(频谱范围)。

2. 分辨带宽和精细常数

光谱仪器的分辨率是分辨极限 $\delta\lambda$ 对波长 λ 的比值。 $R_0 = (\delta\lambda/\lambda)$ 。在共焦球面扫描干涉仪中,分辨极限常用 $\delta\nu$ 表示。 $\delta\nu$ 称为扫描干涉仪的分辨带宽,或称为仪器带宽。分辨率 $R_0 = (\delta\nu/\nu)$ 高达 10^8 。使用中希望 $\delta\nu$ 尽量窄,但还应考虑到仪器的自由光谱区。把自由光谱区同仪器带宽的比值 F 称为仪器精细常数。

$$F = \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\Delta\nu}{\delta\nu}. \quad (4)$$

它表征了干涉仪在它的自由光谱区内可分辨的光谱单元数。它是扫描干涉仪最重要的参数。 F 越高,仪器性能越好。

影响仪器精细常数的主要因素有反射镜面的反射率、反射镜面的规整度和离焦量等。Hercher给出的公式^[1]是:

反射率 R 对精细常数的影响,当 $R \rightarrow 1$ 时

$$F_R = \pi R / (1 - R)^2 \approx \pi / 2(1 - R). \quad (5)$$

规整度对精细常数的影响

$$F_P = \frac{S}{2}, \quad (6)$$

式中 S 是光学加工中的规整度 (λ/S) 中参数。综合起来考虑就是

$$F = 0.6F_R = 0.6F_P. \quad (7)$$

离焦量 ϵ 是指共焦球面扫描干涉仪中,两个球面反射镜的焦点不重合误差。它是影响干涉仪精细常数(分辨线宽)的一个重要因素。

给出的最大允许离焦量表达式^[1]为:

$$\epsilon_{\max} = \frac{\pi r}{2(M+N+1)F}, \quad (8)$$

式中 M 、 N 是激光模式中横模的分布参数。 $(M+N+1)$ 取几十到100的量级。 $|\epsilon|_{\max}$ 在 μm 的量级上, F 才能达到100以上。

二、仪器的设计考虑

研制近红外的共焦球面扫描干涉仪是为清华大学观测窄线宽单模半导体激光器模式开

始工作的。仪器参数的选取,主要是考虑半导体激光器性能的要求。

1. 自由光谱区的选取

一般设计扫描干涉仪时,应使仪器的自由光谱区复盖所分析的光源谱线宽度。半导体激光器发射的光谱宽度取决于被激励的纵模数,一般是3~4个纵模,半强宽为5~10 Å。在单模运转时半强宽为0.1 Å。换成频率表示:

$$(1) \text{ 在 } 0.85 \mu\text{m} \text{ 附近, } \Delta\lambda = 5 \text{ \AA}, \text{ 则 } \Delta\nu \approx 200 \text{ GHz,}$$

$$\Delta\lambda = 0.1 \text{ \AA}, \text{ 则 } \Delta\nu \approx 4 \text{ GHz;}$$

$$(2) \text{ 在 } 1.3 \mu\text{m} \text{ 附近, } \Delta\lambda = 5 \text{ \AA}, \text{ 则 } \Delta\nu \approx 90 \text{ GHz,}$$

$$\Delta\lambda = 0.1 \text{ \AA}, \text{ 则 } \Delta\nu \approx 1.8 \text{ GHz.}$$

共焦球面扫描干涉仪的自由光谱区要复盖上百 GHz 的光谱范围不仅是不可能的,而且也是没有必要的。我们的目的是观测单纵模的线宽。自由光谱区只要大于4 GHz 即可。根据实验室现有的光学加工磨具、样板情况,取 $r = 17.2 \text{ mm} = L$ 。那么自由光谱区, (空气中 $n \approx 1$)

$$\Delta\nu = \frac{c}{4nL} \approx 4.3 \text{ GHz.} \quad (9)$$

设计取精细常数 $F \geq 100$ 。那末仪器的分辨带宽, $\delta\nu = (\Delta\nu/F) \leq 43 \text{ MHz}$ 。

2. 反射镜的反射膜层

它直接影响仪器精细常数、透过率及仪器工作的光谱范围。共焦球面扫描干涉仪作为高分辨仪器,应有高的精细常数。按我们设计的精细常数 ≥ 100 。从(6)式和(7)式计算 $F = 0.6F_R$, 则 $F_R \geq 167$,

$$R \geq 1 - \frac{\pi}{2F_R} \approx 1 - \frac{3.14}{334} \approx 0.99. \quad (10)$$

即反射率 R 必须高于99%,一般镀硫化锌,氟化镁多层介质膜是容易达到的。反射膜层的中心波长在 $0.85 \mu\text{m}$ ($1.3 \mu\text{m}$) 处。带宽尽量宽 ($0.85 \mu\text{m}$ 时 1500 \AA , $1.3 \mu\text{m}$ 时 2000 \AA)。

3. 球面反射镜的规整度和口径

主要考虑提高仪器的精细常数 F 。根据(6)式和(7)式,要使 $F \geq 100$, 则

$$S = 2F_P = 2 \times 100 / 0.6 \approx 334. \quad (11)$$

反射镜的规整度要达到 $(\lambda/S) \leq \lambda/334$ 。在 $1.3 \mu\text{m}$ 处使用,加工时用 $0.55 \mu\text{m}$ 的光检查,则要达 $\lambda/140$ 。这样高的规整度是很难达到的。我们采用加大加工面积、缩小使用面积的方法^[9]。采用 $\phi 10 \text{ mm}$ 口径,加 $\phi 0.5 \sim \phi 0.8 \text{ mm}$ 的光阑。这样在 $\phi 10 \text{ mm}$ 的整体范围内保证 $\lambda/10$ 的光圈要求,而在 $\phi 1 \text{ mm}$ 范围内使用,达到 $\lambda/140$ 的规整度是没问题的。实际结果,干涉仪达到了120的精细常数。按(6)式和(7)式计算达到了 $\lambda/169$ 。

4. 腔体结构考虑

离焦量大小,是装调中影响精细常数的关键因素。为了使离焦量达到最小,并保证在装调中,使干涉仪的两个反射镜同轴,我们设计了一个如图2所示的干涉仪腔体。图中右边的镜座,有 0.5 mm 螺距的调整螺纹,并有和腔体达到滑配合的圆柱面。

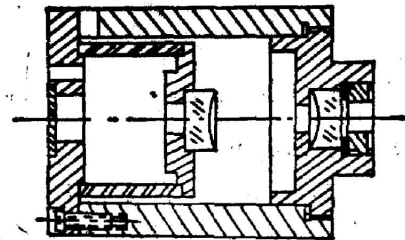


Fig. 2 Structural drawing of confocal interferometer

这样可达到微小的调整;同时还能保证在调整过程中两个镜片同轴。另外在加工中,在可能的条件下,尽可能提高配合件的配合精度。

为了减小温度变化引起的干涉仪频率漂移,在结构上,采用腔体材料和压电陶瓷安置相向方向膨胀。并且选用了腔体材料膨胀系数比压电陶瓷膨胀系数小的 $4J_{86}$ 材料,使其有相互补偿的效果。

在共焦球面扫描干涉仪的设计中,压电陶瓷的长度应选择合适。压电陶瓷上加的锯齿波电压,每个周期应使反射镜间的距离变化达到干涉图形变化一个级次以上。对 $1.3\mu\text{m}$ 波段,干涉图变化一个级次,镜间距离变化为

$$\Delta L = (\lambda/4) = 0.325\mu\text{m} = 3250\text{\AA} \quad (12)$$

压电陶瓷伸长系数 $13\text{\AA}\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, 我们现有 15mm 长的压电陶瓷,锯齿波发生器峰电压 180V 。

$$\Delta L = 13 \times 1.5 \times 180 = 3510\text{\AA} \quad (13)$$

(13)式中的 $3510\text{\AA} > 3250\text{\AA}$, 说明能达到扫描一个级次。如果用 25mm 或 30mm 长的压电陶瓷情况更好,因此,这样就可降低扫描电压,使其扫描线性更好。

透过扫描干涉仪的信号探测,在 $0.85\mu\text{m}$ 波段可用红外光电倍增管接收再输入到示波器上显示;在 $1.3\mu\text{m}$ 波段,使用 APD 探测器,并加了放大后输入到示波器上显示。

三、仪器的使用结果

研制的几台共焦球面扫描干涉仪已供给几个单位用来测试半导体激光器的单模模式。

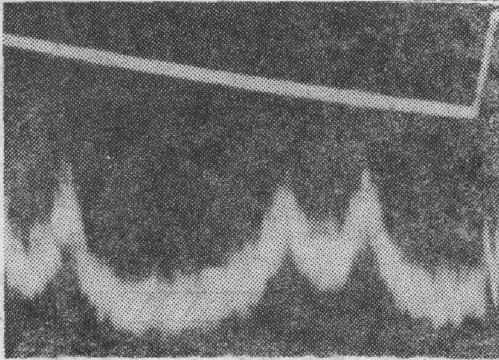


Fig. 3 Spectrums of Cs 133 D_2 ray

首先用于清华大学的 $0.85\mu\text{m}$ 窄线宽单模半导体激光器的研究上。当时的仪器精细常数接近 90 (分辨带宽 $\delta\nu < 50\text{MHz}$)。北京大学无线电系还把此仪器用于红外光谱的精细结构测量上。图 3 就是通过我们的扫描干涉仪拍摄的 Cs133 光谱灯(面光源)的 D_2 线(8521\AA)处的两条谱线照片。

结合清华大学研制 $1.3\mu\text{m}$ 单模窄线宽半导体激光器,我们同清华大学研制了 $1.3\mu\text{m}$ 的共焦球面扫描干涉仪。1986 年 2 月初在清华大学

组织了 $1.3\mu\text{m}$ 单模窄线宽半导体激光器和 $1.3\mu\text{m}$ 共焦球面扫描干涉仪鉴定会。经鉴定会测试小组测定:自由光谱区 4300MHz , 仪器分辨带宽 36MHz , 精细常数达 120。图 4(a)和图 4(b)分别是 $1.3\mu\text{m}$ 半导体激光器单模和多模运转下,通过扫描干涉仪拍得的照片。

在 $1.3\mu\text{m}$ 共焦球面扫描干涉仪的研制中,清华大学的霍玉晶、陈家华、王文申等同志制作了 APD 的放大器,并参加了调整工作,对此表示衷心感谢。

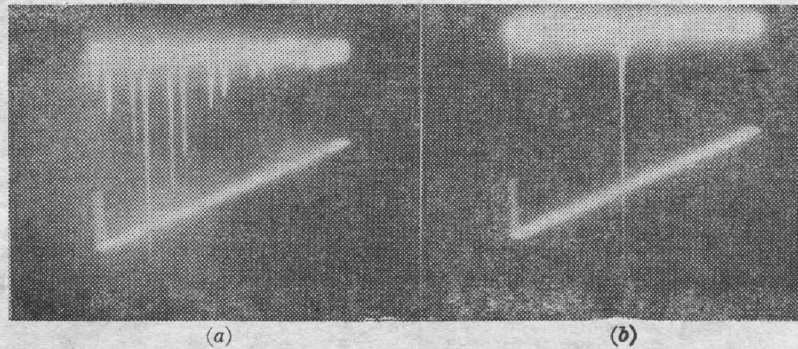


Fig. 4 Spectrums of InGaAs semiconductor

(a) Single-mode; (b) Multimode

参 考 文 献

- [1] M. Hercher; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, No. 5 (May), 951~966.
 [2] 袁树忠等;《激光》, 1981, **8**, No. 1 (Jan), 35~38.

The near infra-red confocal scanning interferometer

YUAN SHUZONG

(Modern Optics Institute, Nankai University, Tianjin)

(Received 4 March 1986; revised 4 June 1986)

Abstract

In this paper, the scanning interferometer with confocal spherical cavity structure is described, which is operated round $0.85\ \mu\text{m}$ and $1.3\ \mu\text{m}$ respectively. The free spectral range of the interferometer is 4.3 GHz, and the highest resolution is 36 MHz (finesse is about 120).