

基于 Fabry-Perot 腔阵列的集成化微型光谱仪方案及模拟

温志渝, 陈刚, 王建国*

重庆大学光电工程学院, 重庆 400044

摘要 提出了一种微型光谱仪, 该微型光谱仪基于法布里-珀罗腔滤波性的阵列式微型光谱仪。其基本结构是在硅基底上实现多个不同腔长的阵列, 从而实现对多个波长的监测。探测单元即为一个法布里-珀罗腔, 由硅基底-金属薄膜-二氧化硅层-金属薄膜构成。进行了相应的模拟计算, 结果表明在基本结构为铝膜(14 nm)-SiO₂-银膜(39 nm)的情况下, 通带半宽度可达到 15 nm, 单个探测单元面积仅为 0.14 mm×0.14 mm 即可达到微型光栅式光谱仪(最小体积在 cm 量级)的光通量, 整个光谱探测部分体积仅在 mm 量级。该微型光谱仪设计尺寸在几个 mm 的量级、无活动部件, 可以同时多个波长进行检测, 并可望利用现有 IC 加工手段实现光谱仪传感器化。

关键词 微型光谱仪; Fabry-Perot 腔

中图分类号: TH744.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0593(2006)10-1955-05

引言

光谱仪器是分析物质化学组成及含量的重要分析仪器, 已在现代科学实验、生物医学、工农业生产、国防等领域得到极其广泛的应用。在许多应用领域, 光谱分析系统的尺寸的缩小比分辨率的提高更为重要^[1]。特别是在航天航空等研究领域, 光谱仪器微型化的意义尤为重大。20 世纪 90 年代以来, 国内外已提出了多种光谱仪器小型化、微型化的方案^[2]。然而, 大多数微型光谱仪仍然是采用光栅作为分光器件, 因此很难真正微型化和集成化。本文提出了一种基于 Fabry-Perot 阵列微型化光谱仪, 其体积可以只有几个 mm 的量级而且无活动部件, 这都将大大减小系统的体积并提高系统的可靠性。

1 基本结构与原理

微型 Fabry-Perot 光谱仪是基于 Fabry-Perot 腔的滤波性的阵列式微型光谱仪, 其基本结构如图 1 所示。在硅基底上实现多个不同腔长的阵列, 从而实现对多个波长的监测。图 2 中给出了每个探测单元的基本结构, 探测单元即为一个 Fabry-Perot 腔, 由硅基底-金属薄膜-二氧化硅层-金属薄膜构成, 其中二氧化硅层的厚度将决定中心波长的取值, 当二氧化硅层厚度确定后即透射光的干涉级次一定的情况下金属

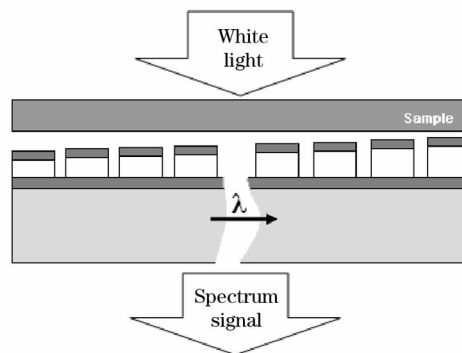


Fig. 1 Basic structure of the miniature Fabry-Perot spectrum instrument

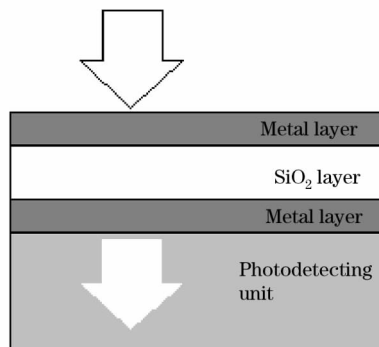


Fig. 2 Basic structure of probing unit

收稿日期: 2005-05-08, 修订日期: 2005-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(60308007)资助项目

作者简介: 陈刚, 1973年生, 重庆大学光电工程学院博士后

* 通讯联系人

反射膜的反射率将决定光谱仪的分辨率。

2 相关理论及模拟

2.1 光学薄膜等效界面的计算

以下我们针对上述结构,进行光学模拟,计算单个单元中心波长和带宽与光学膜层结构之间的关系。模拟采用计算薄膜组合的特征矩阵而得到膜层的光学特性,最终计算出每个单元结构的透射率。为了简单起见,我们将整个结构等效成 2 个界面,3 个介质层,如图 3 所示。

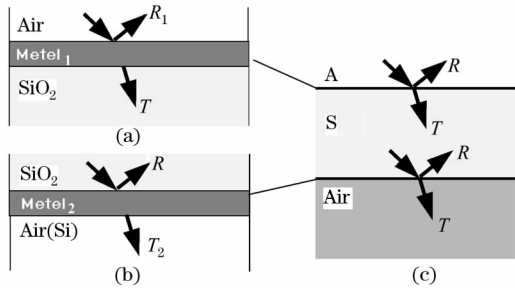


Fig. 3 Equivalent predigestion of optical configuration

薄膜的特征矩阵^[3]可以通过以下公式计算。

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \delta_k &= 2\pi N_k d_k \cos\theta_k / \lambda_0 \\ \eta_k &= N_k / \cos\theta_k \rightarrow \text{计算横磁波即 } P\text{-分量时} \\ \eta_k &= N_k \cos\theta_k \rightarrow \text{计算横电波即 } S\text{-分量时} \\ N_k(\lambda) &= n_k(\lambda) - ik(\lambda) \end{aligned}$$

d_k 是第 k 层薄膜的厚度, θ_k 是光线在第 k 层薄膜中的折射角, N_k 是第 k 层薄膜的光学导纳, λ_0 为光线在真空中的波长。从而相应膜系的反射率 R 和透射率 T 可以通过以下公式^[3]求出。

$$\begin{aligned} R &= \left| \frac{\eta_1 B - C}{\eta_1 B + C} \right|^2 \\ T &= \left| \frac{4\eta_1 \eta_{k+1}}{\eta_1 B + C} \right|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

本文中采取的模拟主要针对垂直入射的情形,也就是 $\theta_k = 0$, 对于横电波和横磁波公式都一样,因此公式简化:

$$\begin{aligned} \delta_k &= 2\pi N_k d_k / \lambda_0 \\ \eta_k &= N_k \end{aligned}$$

由此我们得到两个等效界面的特征矩阵

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ C_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_{\text{metal1}} & \frac{i}{\eta_{\text{metal1}}} \sin\delta_{\text{metal1}} \\ i\eta_{\text{metal1}} \sin\delta_{\text{metal1}} & \cos\delta_{\text{metal1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{\text{SiO}_2} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$\begin{bmatrix} B_2 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_{\text{metal2}} & \frac{i}{\eta_{\text{metal1}}} \sin\delta_{\text{metal2}} \\ i\eta_{\text{metal1}} \sin\delta_{\text{metal2}} & \cos\delta_{\text{metal2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{\text{Air(Si)}} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

进一步得到两等效界面的反射率和透射率

$$R_1 = \left| \frac{\eta_{\text{Air}} B_1 - C_1}{\eta_{\text{Air}} B_1 + C_1} \right|^2, T_1 = \left| \frac{4\eta_{\text{Air}} \eta_{\text{SiO}_2}}{\eta_{\text{Air}} B_1 + C_1} \right|^2$$

$$R_2 = \left| \frac{\eta_{\text{SiO}_2} B_2 - C_2}{\eta_{\text{SiO}_2} B_2 + C_2} \right|^2, T_2 = \left| \frac{4\eta_{\text{SiO}_2} \eta_{\text{Air(Si)}}}{\eta_{\text{Air(Si)}} B_2 + C_2} \right|^2 \quad (4)$$

利用单层膜的多光束干涉原理,可以到整个膜系的透射率

$$T = \left| \frac{T_1 T_2 \exp(i\delta_{\text{SiO}_2})}{1 - R_1 R_2 \exp(i2\delta_{\text{SiO}_2})} \right|^2 \quad (5)$$

由于金属层存在吸收,因此 $T+R \neq 1$ 。

2.2 数值模拟结果

2.2.1 金属薄膜材料光学特性的模拟计算结果和根据结果对材料的选择

考虑到与半导体工艺相兼容,我们选择金属薄膜作为 Fabry-Perot 腔阵列的反射膜层,本文计算中所使用的光学

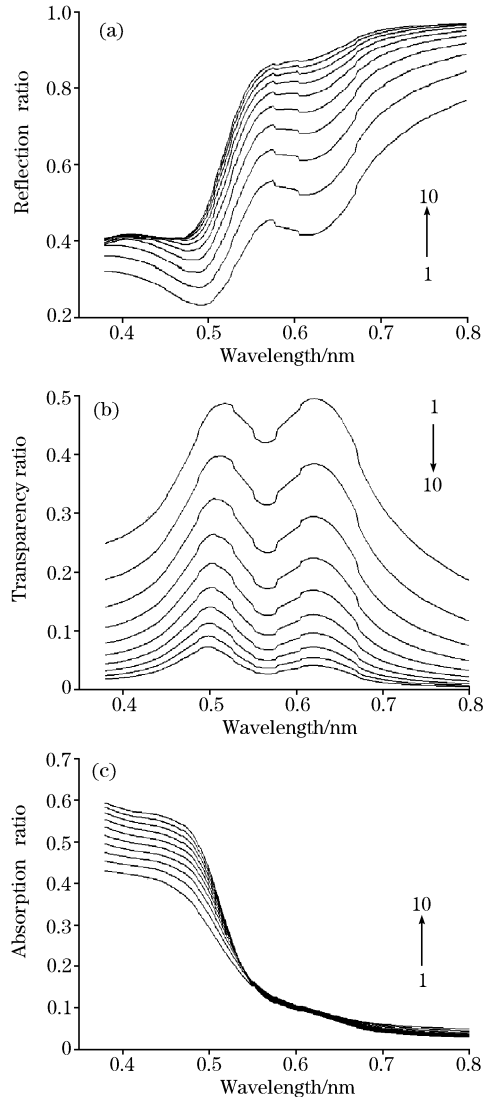


Fig. 4 Reflection ratio, transparency ratio and absorption ratio of different thickness of gold films

(a) Reflection ratio; (b) Transparency ratio;

(c) Absorption ratio

Thickness of gold film:

1: 0.020; 2: 0.025; 3: 0.030; 4: 0.035;

5: 0.040; 6: 0.045; 7: 0.050; 8: 0.055;

9: 0.060; 10: 0.065 μm

参数均来源于文献[4], 根据上面的公式, 我们分别针对目前最常用的金、银和铝 3 种金属膜材料, 根据我们提出的结构进行了模拟, 此处列出了部分模拟结果, 如图 4~图 6 所示。

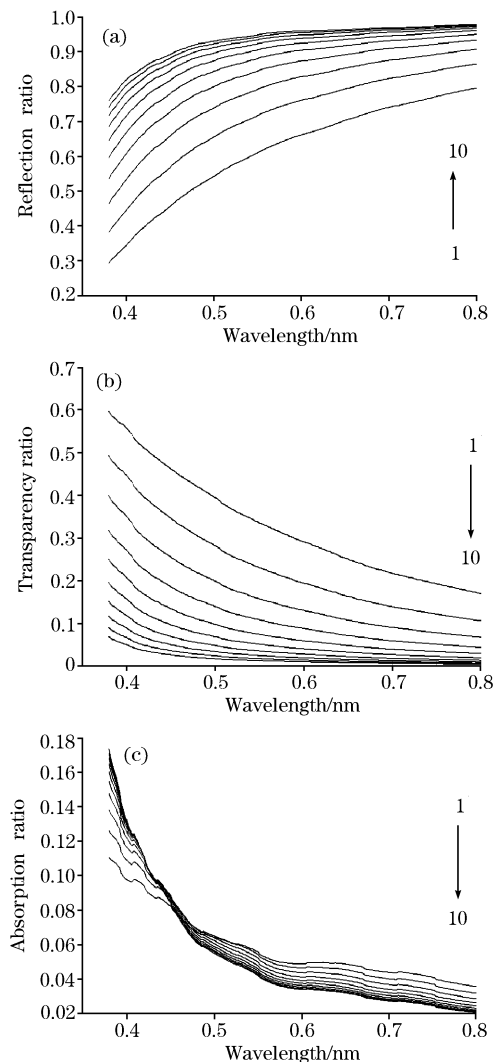


Fig. 5 Reflection ratio, transparency ratio and absorption ratio of different thickness of silver films

(a) Reflection ratio; (b) Transparency ratio;

(c) Absorption ratio

Thickness of silver films:

1: 0.020; 2: 0.025; 3: 0.030; 4: 0.035;

5: 0.040; 6: 0.045; 7: 0.050; 8: 0.055;

9: 0.060; 10: 0.065 μm

(1) 金薄膜

由模拟结果可以看出, 金膜在短波长范围(380~500 nm)反射率较低, 这将导致短波长范围的 Fabry-Perot 单元光谱带宽增加, 从而降低分辨率。同时, 金膜在短波长范围内(380~500 nm)有较强的吸收(在膜厚度为 20 nm 时, 吸收率在 40% 左右), 这会大大减弱透射光的强度, 这些都会限制金膜在本系统中的应用。

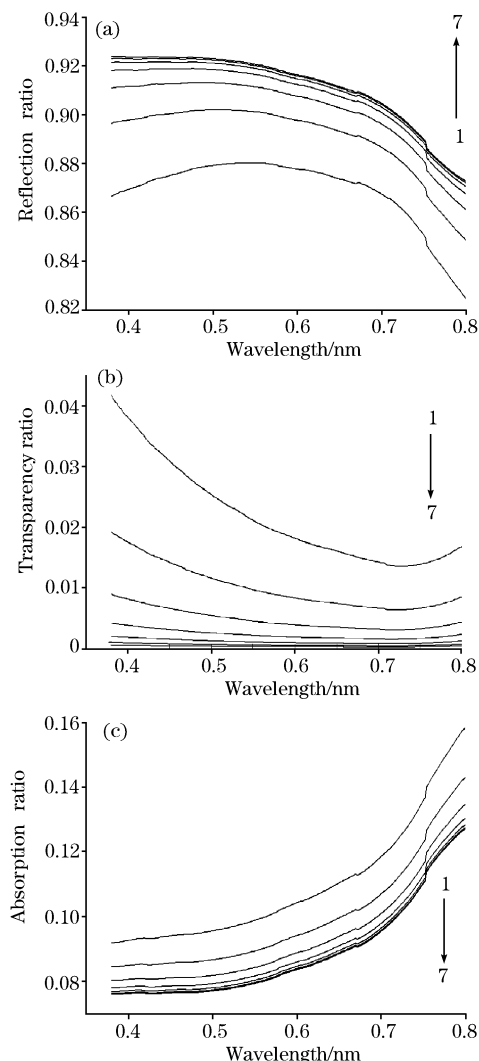


Fig. 6 Reflection ratio, transparency ratio and absorption ratio of different thickness of aluminium films

(a) Reflection ratio; (b) Transparency ratio;

(c) Absorption ratio

Thickness of aluminium films:

1: 0.020; 2: 0.025; 3: 0.030; 4: 0.035;

5: 0.040; 6: 0.045; 7: 0.050 μm

(2) 银薄膜

由模拟结果可以看出, 银膜在整个波长范围(380~800 nm)可以达到较高的反射率, 尤其是在长波范围, 这将有利于 Fabry-Perot 单元光谱带宽减小, 有利于提高光谱分辨率。同时在整个波长范围内(380~800 nm)对入射光的吸收相对较弱(在膜厚度为 65 nm 时, 吸收率在 20% 以下), 这有利于提高透射光的强度, 因此银膜可以作为本系统的候选反射薄膜。

(3) 铝薄膜

由模拟结果可以看出, 铝膜在整个波长范围(380~800 nm)可以达到较高的反射率, 尤其是在短波长范围内, 这将有利于 Fabry-Perot 单元光谱带宽减小, 提高光谱分辨率。

同时在整个波长范围内(380~800 nm)对入射光的吸收较弱(在膜厚度为 65 nm 时,吸收率在 20% 以下),这有利于提高透射光的强度,因此铝膜可以作为本系统的候选反射薄膜。

同时我们发现,单种金属薄膜,都无法在整个波长范围内实现很高的反射率。然而我们发现银膜和铝膜具有一定的互补性,这样可以通过在 SiO_2 层上下表面分别使用银膜和铝膜,实现系统在整个波段范围内(400~800 nm)具有较高的反射率和较小的吸收率。同时我们可以利用以上各种金属膜在不同波段的反射率、吸收率之间的互补性实现对无用级次的抑制。

2.2.2 有关结构尺寸选择的模拟计算

通过以上对金属薄膜反射、透射以及吸收特性进行了模拟分析后,我们目前初步选择了铝膜-二氧化硅膜(腔体)-银膜构成微型 Fabry-Perot 腔。对不同厚度的膜层进行了模拟分析,得到以下初步结果:通过模拟和分析发现分辨率、透射率及反射率之间的矛盾,高分辨率意味着高反射率,而在入射端面的反射会导致进入光学系统的光能大大减小,这比金属薄膜层吸收的影响更大。但由于 Fabry-Perot 腔阵列光谱探测器结构的分辨率与腔体面积无关,因此可以通过增大腔体截面,提高透射光能。从而在保证透射光强足够的前提下,牺牲透射率,实现较高的光谱分辨率。图 7 给出了空气-金属- SiO_2 -金属-空气结构的计算机模拟结果,由于金属膜层厚度的不同导致反射膜的反射率和透射率的不同,由上面的模拟计算可知金属膜层越厚反射率越高而透射率越小。这就说我们不可能同时获得高分辨率和透射率,但我们可以通过对各种不同金属膜层厚度的计算选出我们所要求下的最佳尺寸来满足我们的要求。当然透射光谱的分辨率也与干涉级次相关,要使光谱分辨率越高则可以选取高干涉级次,但薄膜间隔层即 SiO_2 的厚度不能太厚,因为薄膜间隔层的厚度超过第四级次,就开始显得粗糙。间隔层表面的这种粗糙度展宽了通带,压低了峰值透射率,使得更高级次完全失去了其任何优越性^[3]。同时 SiO_2 层厚度太厚也会使谱线重叠严重。在模拟计算中我们选取了小于四级的干涉级次。我们主要针对生化光谱分析常用的几个波长(492, 510, 546, 578 和 630 nm)进行了模拟分析通过计算我们得到了在光谱通带半宽度小于 15 nm 时,透射率最高的结构尺寸。发现铝薄膜层银薄膜层的厚度分别在 14 和 39 nm 时都基本上达到最佳。

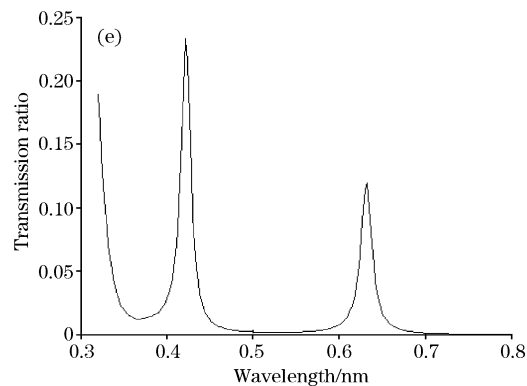
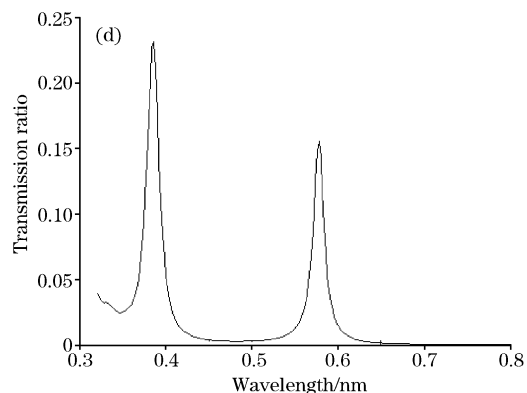
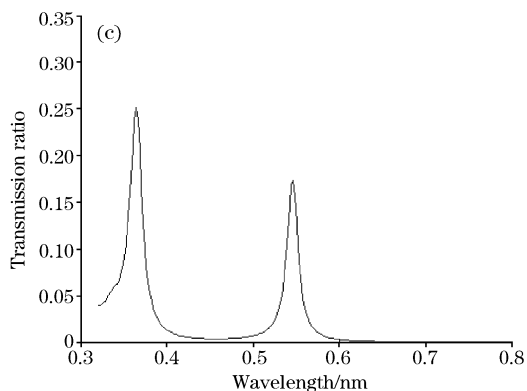
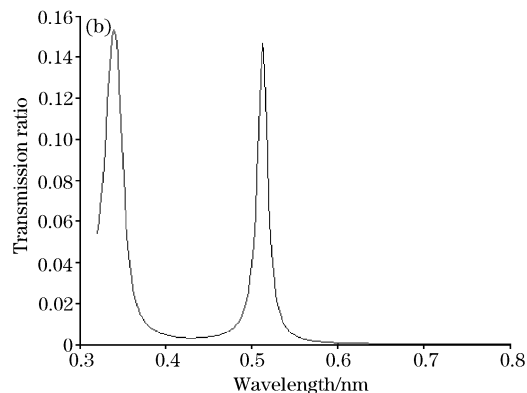
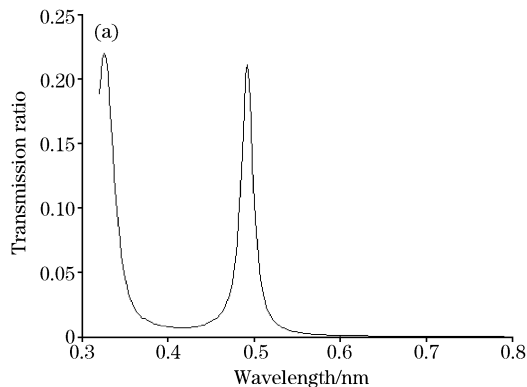


Fig. 7 Transmittance at different center wavelength and thickness of silicon dioxide films

- (a): center wavelength 492 nm, thickness 0.373 3 μm ;
 (b): center wavelength 510 nm, thickness 0.386 9 μm ;
 (c): center wavelength 546 nm, thickness 0.410 0 μm ;
 (d): center wavelength 578 nm, thickness 0.432 2 μm ;
 (e): center wavelength 630 nm, thickness 0.469 7 μm

图 7 显示了我们的模拟结果(对于不同的中心波长 SiO_2 膜的厚啡有所不同)。

可以发现透射率都大于 10%。与光栅式微型光谱仪比较,对于使用狭缝为 $50\ \mu\text{m}$ (光栅芯径),其通光面积仅为 $0.002\ \text{mm}^2$,若光栅效率 40%,相应的 Fabry-Perot 腔微型光谱仪,只需要把表面积增加到 $0.02\ \text{mm}^2$,若以正方形计算,每个 Fabry-Perot 腔单元的面积尺寸仅为 $0.14\ \text{mm} \times 0.14\ \text{mm}$ 即可实现比光栅式微型光谱仪大得多的光通量。

2.2.3 关于光斜入射的模拟计算

如果光线不是垂直入射在 Fabry-Perot 腔表面上,以一定的人射角入射时,显然由于各个干涉光线的光程差的变化会引起中心波长的变化。同时由于横电波和横磁波斜入射时在薄膜表面的反射率和透射率的不同需要分别计算。在计算中选用单元的面积尺寸为 $0.5\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$,计算结果表明只是几度的斜入射光线对光谱通带半宽度改变并不大,对于

光谱带宽要求不高的情况仍然能够满足要求。不过也必须尽量使光束垂直入射在 Fabry-Perot 腔体表面上,以免中心波长偏离太远。

3 结 论

本文提出的基于 Fabry-Perot 腔的集成化微型光谱仪旨在实现光谱仪器的传感器化,通过对光学结构的模拟,结果表明在基本结构为铝膜(14 nm)- SiO_2 -银膜(39 nm)的情况下,分辨率可达到 15 nm,单个探测单元面积仅为 $0.14\ \text{mm} \times 0.14\ \text{mm}$ 即可达到微型光栅式光谱仪(最小体积在 cm 量级)的光通量,整个光谱探测部分体积仅在 mm 量级。该方案为实现光谱仪器光学结构和相应探测处理电路的单片集成提供了可能性。

参 考 文 献

- [1] Nishihara H, Haruna M, Suhara T. Optical Integrated Circuits. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [2] JU Hui, WU Yi-hui(鞠 挥, 吴一辉). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2001, 9(4): 372.
- [3] TANG Jin-fa, ZHENG Quan(唐晋发, 郑 权). Application of Film Optics(应用薄膜光学). Shanghai: Scientific and Technical Publishers (上海: 科学技术出版社), 1984.
- [4] Dalik Edward D. Handbook of Optical Constants of Solids. Orlando Florida, USA: Academic Press Inc, 1985.

The Project and Simulation of a Composite Miniature Spectrum Instrument Based on the Array of Fabry-Perot Cavity

WEN Zhi-yu, CHEN Gang, WANG Jian-guo*

Photoelectricity Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract This paper advances a kind of micro-spectrometer based on Fabry-Perot cavity's character of filtering the waves. The basic structure of the micro-spectrometer is the array of Fabry-Perot cavity which contains many different lengths of cavity on the substrate of silicon, consequently the authors can achieve the detection at several wavelengths simultaneously. The unit of probing is a Fabry-Perot cavity made up of the substrate of silicon-metal film-silicon dioxide layer-metal film. The authors carried out the corresponding simulation. In the basic structure of aluminum film(14 nm)-silicon dioxide layer-silver film(39 nm), the resolution can reach 15 nm. When the area of a unit of probing is $0.14\ \text{mm} \times 0.14\ \text{mm}$ only, it can reach the luminous flux of miniature grating spectrum instrument(the minimum volume in the order of cm), but the volume of the part of spectrum detection is only of the order of mm. The design size of the micro-spectrometer is a few millimeters. Furthermore it has no movable parts and could detect several wavelengths at the same time. It is possible to fabricate such micro-spectrometer through existing processing methods of IC technology.

Keywords Miniature spectrum instrument; Fabry-Perot antrum

(Received May 8, 2005; accepted Aug. 28, 2005)

* Corresponding author