

## 红外成像光谱测量中 Dyson 光学系统的研究进展

刘玉娟<sup>1, 2</sup>, 唐玉国<sup>1\*</sup>, 巴音贺希格<sup>1</sup>, 崔继承<sup>1, 2</sup>, 齐向东<sup>1</sup>

1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 传统的红外成像光谱仪难以同时实现弱遥感信号下的高信噪比和仪器小型化的要求, 基于 Dyson 同心光学结构的新型遥感红外成像光谱仪具有数值孔径大、信噪比高、结构简单、体积小、重量轻的优点, 用于强背景信号下的微弱红外成像光谱信号测量时, 可实现传统的红外成像光谱仪难以实现的高信噪比测量。本文概述了 Dyson 同心光学结构的产生、发展及最新研究动态, 重点介绍了 Dyson 同心光谱仪的原理、研制过程中的难点以及在高性能遥感红外成像光谱测量中的应用, 为高性能红外成像光谱仪的研究提供了参考。

**关键词** 成像光谱; 同心; Dyson; 红外

中图分类号: TH744 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)02-0548-05

### 引言

成像光谱技术是20世纪80年代起源于遥感领域的新型分析技术, 可同时获得探测目标的空间信息和光谱信息, 对目标进行空间“定位”分析的同时进行“定性”分析<sup>[1-5]</sup>。近年来随着光学制造技术和探测器制造技术的发展, 成像光谱技术得到越来越广泛的应用。在成像光谱遥感检测应用中很多物质在长波红外(LWIR)光谱范围内显现出其独特的分子特性, 而且由于这些物质材料在地面温度下的高光谱信号接近峰值, 可以将大气影响完全消除从而提高目标探测的精度。红外成像光谱成为高指标遥感探测应用的首选。红外成像光谱仪是实施遥感红外成像光谱技术的核心设备, 从遥感信息中准确提取出红外光谱信息和空间信息, 要求红外成像光谱仪系统具有信噪比(SNR)高、定标准确性高、空间和光谱响应均一性高等特性<sup>[6-9]</sup>。但由于技术、成本等方面的限制, 遥感平台一般对所搭载的成像光谱仪的体积和重量都有严格限制; 在生态系统检测、海洋环境探测等强背景信号下的微弱、低对比度信号探测时, 高信噪比也是实际中对成像光谱仪必不可少的要求。传统的成像光谱仪一般以牺牲仪器尺寸指标为代价提高信噪比, 难以同时实现高信噪比和小尺寸低成本的要求。

Dyson 首次提出用于校正光学系统像差的高性能同心光学结构及 Dyson 同心理论<sup>[10]</sup>; Mertz 证明了基于 Dyson 同心光学结构可以得到高通量的光谱仪系统<sup>[11]</sup>, 但当时并未得到推广应用。近20年来, Dyson 理论的光谱应用发展非常缓慢, 直到20世纪90年代随着成像光谱技术发展及其应用的推广, 传统的成像光谱仪难以同时满足高性能遥感目标探测中信噪比和仪器尺寸的要求, Dyson 同心光学结构由于其独特的优点被应用到高要求的空间遥感领域, Dyson 理论的光谱应用由此得到新的发展<sup>[12-16]</sup>。但由于其结构本身对材料加工以及元件选取的苛刻要求, Dyson 原始光学结构并不适应目前的应用需求, 国外学者对此展开了多种基于 Dyson 同心光学系统的成像光谱仪研究, 展现了 Dyson 同心光学系统在遥感成像光谱测量领域巨大的应用潜力和研究意义。

### 1 遥感成像光谱仪的原理

遥感成像光谱仪通过分析目标反射的太阳光谱对某区域的物质成分进行识别, 同时根据空间信息对该成分进行空间定位, 其工作原理如图1所示。太阳光经地面目标反射后穿过大气层进入遥感成像光谱仪的光学系统, 成像光谱仪的光学系统包括前置成像系统和光谱仪系统两个子系统组成, 狭缝将这两个子系统有机的结合起来。以推扫式遥感成像光谱

收稿日期: 2011-05-18, 修订日期: 2011-08-19

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZBYZ2008-1), 国家创新方法工作专项项目(2008IM040700)和吉林省科技支撑计划项目(20106011)资助

作者简介: 刘玉娟, 女, 1984年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: xuliuyujuan@163.com

\*通讯联系人 e-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

仪为例, 成像系统将目标成像在狭缝上, 狭缝像经光谱仪系统分光后被探测器接收。狭缝作为光栏使穿轨方向的条带成像并分光系统分光后被面阵 CCD 接收, 单帧图像获取条带的空间信息和全波段光谱信息, 通过扫描, 形成包括二维空间信息( $x, y$ )和一维光谱信息( $\lambda$ )的成像光谱数据立方, 图中 A, B, C 的全波段成像和各点光谱, 由于不同物质的电磁波吸收特性不同, 通过各点光谱信息, 可以得到各点的物质组成及其含量。

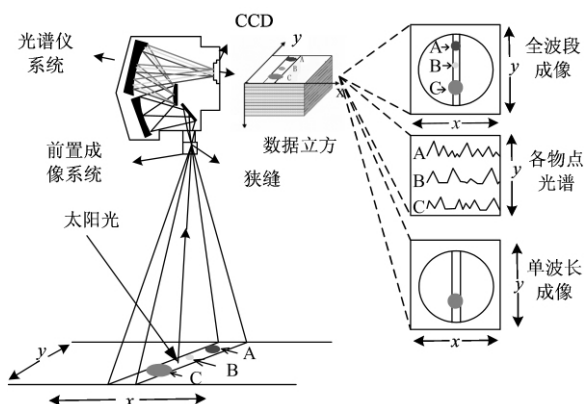


Fig 1 Schematic of the remote sensing imaging spectrometer

遥感成像光谱仪的空间分辨率由前置成像系统决定, 探测器一个像元对应的地面空间越小, 空间分辨率越高, 目标空间定位越精确; 光谱分辨率由光谱仪系统决定, 探测器相邻两个像元对应的波长间隔越小, 光谱分辨率越高, 目标识别定性分析越准确。光谱仪系统是成像光谱仪的核心部分, 直接决定着成像光谱仪的性能。同心成像光谱仪是采用同心光学结构作为成像光谱仪的光谱仪系统, 同心系统孔径大、谱线弯曲小、色畸变小、结构简单, 易于实现小型化<sup>[17]</sup>。近年来, 随着遥感应用的需求和光栅制造技术的发展, 同心成像光谱仪得到越来越广泛关注并开始应用于实际高性能遥感仪器中<sup>[16]</sup>。

## 2 Dyson 同心光学结构的基本原理

同心光学系统是由一系列折、反射球面组成的具有同一个球心的光学系统, 该系统具有以下特点: (1)任意一条穿过系统的光线的  $nd$  值为常数。其中  $n$  为光线经过的空间介质折射率,  $d$  为球心到光线的距离; (2)经过公共球心的任意一条直线均为系统的回转对称轴; (3)理想成像时, 入射光线与出射光线平行, 或者入射光线和出射光线到球心的距离之比等于像空间和物空间折射率之比, 并且物点、像点和公共球心在同一条直线上; (4)在全部由折射面组成的系统和由偶次反射面组成的系统中, 实物成虚像, 物和像在球心同侧; 由奇次反射面组成的系统中, 实物成实像, 物和像在球心两侧<sup>[18]</sup>。

Dyson 同心结构除了具有以上特性外还具有其独特优点, 其基本结构如图 2 所示, 该系统由一个厚平凸透镜和一个凹面反射镜组成, 除了平凸透镜的平面外所有表面为同心

球面, 即平凸透镜的凸球面和凹面反射镜在纵向关于物点、像点同心, 如图 2(a)所示。对实际系统来讲, 物缝和像面探测器横向分开, 如图 2(b)所示。透镜的焦面在反光镜面上, 是系统孔径光阑位置, 平面光波经过透镜聚焦在凹面反射镜上, 再经透镜以平行的平面波出射。Dyson 指出将这种结构形式应用于照相平板术中, 在高数值孔径下精确的限制空间范围方面具有很好的特性, 随后的观察数据显示这种结构形式在微平版印刷领域也得到了很好的应用<sup>[19]</sup>。

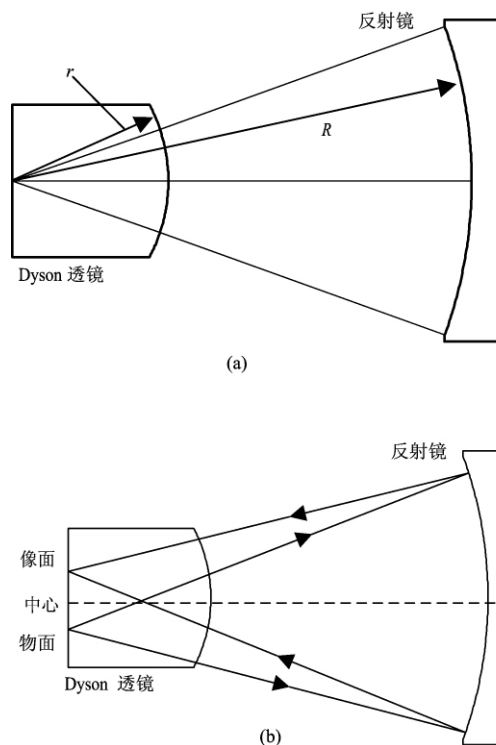


Fig 2 Schematic of the Dyson concentric optical system

Dyson 同心结构的显著特点是光学放大率为 1、数值孔径高、无中心遮拦、无非球面的光学元件。若透镜材料的折射率是  $n$ , 透镜的厚度也就是凸面的曲率半径是  $r$ , 则满足以下关系<sup>[20]</sup>

$$r = (n - 1/n)R$$

## 3 Dyson 同心成像光谱仪的发展

### 3.1 Dyson 同心结构的光谱应用

Mertz<sup>[11]</sup>首次提出用凹面光栅来代替 Dyson 同心系统中的凹面反射镜便可得到光谱摄谱仪, 当时的难点就是凹面光栅的制作, 后来由 Jobin-Yvon 公司提供的全息光栅保证了这种方案的实施。Mertz<sup>[11]</sup>通过建立了一套基于 Dyson 结构和全息光栅的数值孔径为 0.66 的紫外设备首次证明了基于 Dyson 理论可以得到高通量的光谱仪系统, 由于 Dyson 同心系统在宽波段范围内具有良好成像质量的同时可实现系统的结构简单紧凑, 这使光谱仪系统实现了传统光谱仪难以实现的同时具有高通量和小型化的要求。但色散率低、透镜材料的特殊要求、焦距比率不能与望远系统直接匹配、衍射光栅

必须为全息光栅等不足限制了 Dyson 同心光谱仪的推广<sup>[12]</sup>。后来 Wynne 进一步发展了 Dyson 结构在可见和紫外微平版印刷方面的应用,提出了如图 3 所示用同心弯月胶合透镜代替平凸透镜的 Dyson 同心光谱仪进行视场校正的光谱仪系统<sup>[18]</sup>,但 Dyson 同心系统并未得到广泛应用,主要是由于基于 Offner 结构及其派生结构形式的成像光谱仪更加适合低成本、小型化的需求<sup>[20-23]</sup>。

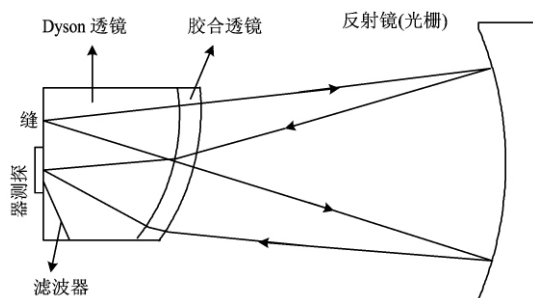


Fig 3 Schematic of the concentric spectrometer with cemented lens

### 3.2 Dyson 同心成像光谱仪的发展

近年来,随着海洋生物学的发展和人类对海洋生态系统监测的需求,沿海生态遥感监测成为高光谱遥感的一个重要应用领域。海洋高光谱遥感监测的光谱范围一般为近红外至中红外甚至远红外,由于海水的反射率要远低于陆地反射率,背景信号较强而有效红外信号较弱,这对高光谱成像仪器的数值孔径和信噪比提出了更高的要求。由于结构特点和凸面光栅制造水平的限制,使倍受关注的 Offner 同心成像仪实现  $F$  数高于 2.5 实际中难度很大、成本较高<sup>[24]</sup>,而 Dyson 同心结构的  $F$  数可以高达 0.66,因此 Dyson 同心结构成为高指标海洋遥感红外成像光谱仪的最佳选择。Dyson 同心成像光谱仪的结构如图 4 所示,狭缝将前置望远系统和光谱仪系统有机的连接起来<sup>[25]</sup>。

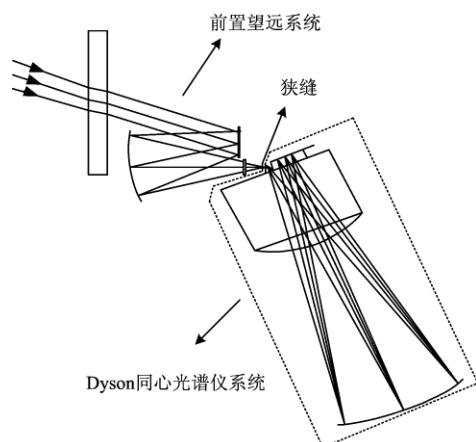


Fig 4 Schematic of the Dyson concentric imaging spectrometer

由于光谱范围和探测器实际尺寸对透镜材料和像面的限制,系统对 Dyson 透镜和像面提出了特殊的要求,原始的 Dyson 结构不能满足遥感红外成像光谱仪的要求, Wynne 的

胶合透镜系统对低温红外也不适用。Dyson 透镜的材料选取必须使用波段的高透过率为原则,使厚 Dyson 透镜在红外波段内实现良好的透过率的材料为 ZnSe 和 NaCl, ZnSe 制作简单且可以镀膜以提高效率但是价格较高,实际中高质量大厚度原材料非常少。NaCl 实际中较易生产,尽管 NaCl 具有吸湿性且会裂开但可以快速加工,为 NaCl 镀 AR 膜比为 ZnSe 镀膜难度大。低温红外光谱仪通常放置在恒温中,当设备打开或在漏气的空间时主要考虑的问题是防潮,利用干燥纯净的氮气就能使其不受周围潮湿空气的损害<sup>[26]</sup>。

Dyson 光谱仪选用的透镜材料不同,实现相同性能相同结构的光谱仪的设计所需的透镜和光栅尺寸相差较大。如图 5 为分别采用 NaCl 和 ZnSe 作为透镜材料时光谱仪的结构图,两个结构均满足 Dyson 同心结构及其特性。由图可见,光栅的口径受透镜材料的影响。

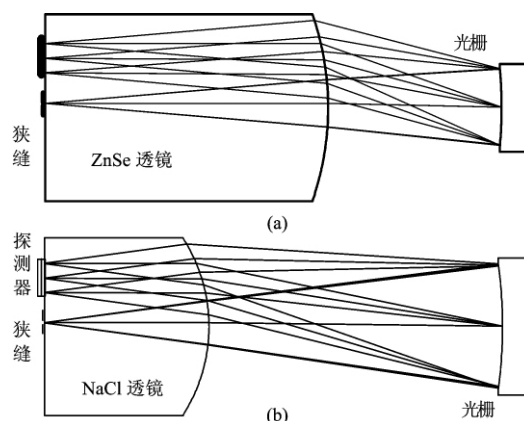


Fig 5 Schematic of the Dyson concentric spectrometer with different lens

#### 3.2.1 Dyson 透镜折叠式同心光谱仪

实际中焦平面探测器一般与比有效探测面积大得多的集成电路芯片封装在一起,这不仅增加了狭缝和像面之间所需要的横向间隔,更重要的是使探测像面产生轴向偏移。Mouroulis 和 Green 提出了采用将 Dyson 透镜折叠的方式将狭缝和焦面分开从而使焦平面从 Dyson 平凸透镜的后表面产生小量的轴向偏离量<sup>[27]</sup>,其光路结构如图 6 所示。但是这种折叠方式仅适用于大厚度的 Dyson 透镜, Dyson 透镜厚度较小时不适合使用这种折叠,该方法的缺点是增加了制造难度同时引入杂散光的问题,不适合太大焦比的光谱仪的设计。

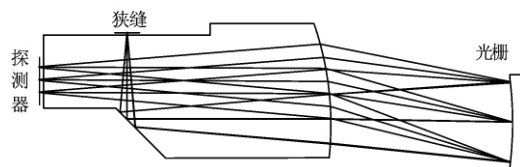


Fig 6 Schematic of the Dyson concentric spectrometer with folded lens

#### 3.2.2 校正球差的 Dyson 同心光谱仪

像面轴向偏移会使红外光谱仪产生球差,光栅是 Dyson

结构的孔径光阑,由焦平面脱离引起的球差可以通过采用非球面光栅进行校正。为了减小光栅的制造难度,非球面光栅通过在靠近光栅光瞳处引入非球面校正透镜实现,其光路结构如图 7 所示。这种结构使得进入平凸透镜后表面的光线折射形成的狭缝的实际像,尽管 Dyson 透镜的凸面仍然关于该像点同心,增加校正器后焦平面从最初的 Dyson 结构分离开了。

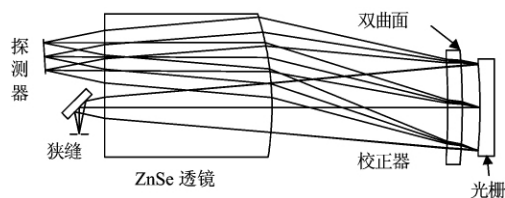


Fig 7 Schematic of the Dyson concentric spectrometer without spherical aberration

### 3.2.3 抑制杂散光的 Dyson 同心光谱仪

Dyson 同心设计由于各表面的多次反射光线会返回焦平面产生杂散光,由于其几何点列斑相对于像元来讲一般尺寸都非常小,偏离同心条件对 Dyson 结构进行校正就能避免了大多数的杂散光源头,虽然会使几何点列斑增大但一般不会超出探测器的尺寸及其公差范围。常采用的偏心设计方法有两种:扩展狭缝使其覆盖探测面积更大、增加输出信号从而增加信噪比或降低积分时间。图 8 给出了通过利用大的探测

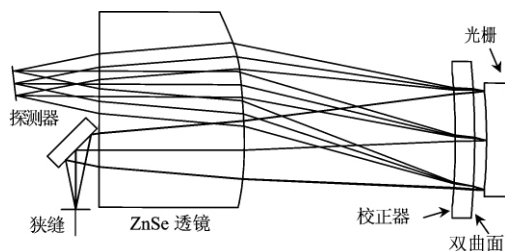


Fig 8 Schematic of the Dyson concentric spectrometer with extended field

阵列扩展视场的结构图。看起来该图与图 7 设计类似,但扩展视场的方向在垂直于光栅色散面的平面内。

另一种偏移方法是在保持探测器像元的前提下通过增加孔径从而增加系统的能量输出提高信噪比。图 9 给出了将图 7 的系统设计增加孔径后的光学结构,为了优化整个成像性能,这种方法已经脱离了严格 Dyson 几何结构。尤其是透镜的后表面采用球形曲面,非球面校正器位于接近 Dyson 透镜的后表面。

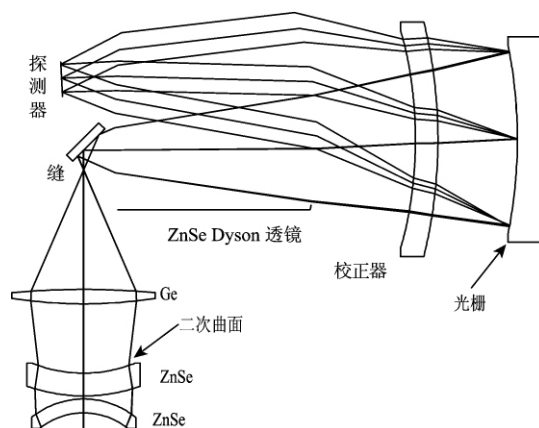


Fig 9 Schematic of the Dyson concentric spectrometer with extended aperture ratio

数值孔径增大的情况下采用 NaCl 也能得到较好的成像质量但是制造 NaCl 的非球面校正器目前难以实现,但可以将球面的 NaCl 透镜、非球面的 ZnSe 校正器、光栅进行组合设计,这种结构是否被采用取决于光学元件材料的可用性、实际加工安装以及维护的相对难度。

## 4 结 论

根据目前遥感红外成像光谱仪的发展需求可以看出: Dyson 同心光谱仪在高性能遥感探测仪器领域具有巨大的应用潜力,尤其是对海洋遥感应用具有重要实际意义。

## References

- [1] Goetz F H, Vane G, Solomon J E. Science, 1985, 228: 1147.
- [2] Rockey D E. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1990, 29: 93.
- [3] Thompson L L. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1990, 29: 105.
- [4] Rast M, Bezy J L. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., 1990, 29: 114.
- [5] Green R O. Appl. Opt., 1998, 37: 683.
- [6] Mouroulis P. Proc. SPIE, 1998, 3842: 594.
- [7] Mouroulis P, Thomas D A. Proc. SPIE, 1998, 3438: 31.
- [8] Mouroulis P. Proc. SPIE, 1999, 3753: 133.
- [9] Mouroulis P, Green R O, Chrien T G. Appl. Opt., 2000, 39: 2210.
- [10] Dyson J. J. Opt. Soc. Am., 1959, 49: 713.
- [11] Mertz L. Appl. Opt., 1977, 16: 3122.
- [12] Lobb D R. Appl. Opt., 1994, 33: 2648.
- [13] Lobb D R. Proc. SPIE, 1997, 3118: 339.
- [14] Mouroulis P, Green R O, Wilson D W. Opt. Express, 2008, 16: 9087.

- [15] Fisher J, Antoniadis J, Rollins C. Proc. SPIE. , 1998, 3842: 179.
- [16] Mouroulis P, Green R O. Proc. SPIE. , 2003, 5173: 18.
- [17] Reininger F Coauthors. Proc. SPIE. , 1996, 2819: 66.
- [18] Charls G W, Opt. Eng. , 1987, 26(4): 300.
- [19] Kwo D, Lawrence G, Chrisp M. SPIE. , 1984, 818: 275.
- [20] Offner A. Opt. Eng. , 1987, 26: 294.
- [21] Mouroulis P, Green R O, Chrien T G. Appl. Opt. , 2000, 39: 2210.
- [22] Carle M Pieters, Joseph Boardman, Bonnie Buratti. Current Science, 2009, 96(4): 500.
- [23] William R. Johnson, Diaziel W Wilson. Proc. , SPIE. 2010, 78120(2): 1.
- [24] Lacy G Cooka, John F Silny. SPIE. , 2010, 78130F: 1.
- [25] Fisher J, Welch W C. Proc. SPIE. , 2006, 62062R: 1.
- [26] Warren D W, Hackwell J A, D. J. Gutierrez D J. Opt. Eng. , 1997, 36: 1174.
- [27] Mouroulis P. Proc. SPIE. , 2009, 7298: 1.

## A Review of Dyson Optical System in the Measure of Infrared Imaging Spectrum

LIU Yu-juan<sup>1, 2</sup>, TANG Yu-guo<sup>1\*</sup>, Bayanheshig<sup>1</sup>, CUI Ji-cheng<sup>1, 2</sup>, QI Xiang-dong<sup>1</sup>

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** It is difficult for the traditional infrared imaging spectrometers to satisfy the requirement of high signal to noise ratio (SNR) and small size simultaneously. The new infrared remote sensing imaging spectrometers based on Dyson concentric optical configuration have the advantages of high aperture, high SNR, simpleness small volume and low weight. The Dyson imaging spectrometers can achieve high SNR, which is difficult for the traditional imaging spectrometers for infrared imaging spectrum. The present review introduces the beginning, the development and the present research of the Dyson imaging spectrometers, especially illustrates the principle of Dyson concentric spectrometer, difficulty during its manufacture and the application in the high-performance infrared remote sensing imaging spectrometers, providing a reference for the high-performance research of infrared remote sensing imaging spectrometers.

**Keywords** Imaging spectrum; Concentric; Dyson; Infrared

(Received May 18, 2011; accepted Aug. 19, 2011)

\* Corresponding author