

# 近红外无创生化分析中集光椭球反射镜 参数设计与优化

高 静<sup>1,2</sup> 卢启鹏<sup>1</sup> 彭忠琦<sup>1</sup> 丁海泉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 近红外光谱技术检测速度快,不破坏样品,可在线分析,是血液无创生化分析能够获得应用的最具潜力的方法之一。但是由于人体血液的吸收光谱信号微弱,而常规光谱仪器在近红外无创生化分析中的光能利用率较低,给无创检测技术应用在临床分析上带来了困难。为了解决此问题,利用椭球反射镜的聚光特性,从几何光学角度出发,分析了椭球镜像点位置分布情况,并采用光线追迹方法优化其初始结构,从而将手指漫反射光高效收集到探测器上。通过仿真分析计算,该椭球反射镜的光能利用率比常规无收集装置的利用率提高了近 5 倍,增强了仪器检测血液吸收光谱信号的能力,有助于提高仪器信噪比。

**关键词** 光学设计;椭球反射镜;光能利用率;近红外;无创生化分析

中图分类号 TN202 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0822007

## Parameter Design and Optimization of Collecting Light Ellipsoidal Reflector in Near Infrared Noninvasive Biochemical Analysis

Gao Jing<sup>1,2</sup> Lu Qipeng<sup>1</sup> Peng Zhongqi<sup>1</sup> Ding Haiquan<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Near infrared spectroscopy (NIRS) has advantages such as high speed, no destroying the samples, and online analysis. Therefore, NIRS is one of the most prospective ways to be applied in noninvasive biochemical analysis of blood. However, the absorption spectrum of blood is weak, and in near infrared noninvasive biochemical analysis, light energy utilization efficiency of conventional spectral instruments is lower. Thus, it is a little difficult in clinical noninvasive analysis with NIRS. In order to solve this problem, ellipsoidal reflector is used which has the focusing characteristic. The distributions of image points are analyzed according to geometric optics, and initial structure of ellipsoidal reflector is optimized by the method of ray tracing. In this way, the detector receives diffused light of finger which is collected with high efficiency. Through the simulation, light energy utilization efficiency of this ellipsoidal reflector raises nearly five times than that of non-optical collection device. It is beneficial to test the absorption spectra of blood and improve the signal-to-noise ratio(SNR).

**Key words** optical design; ellipsoidal reflector; efficiency of light energy utilization; near infrared; noninvasive biochemical analysis

**OCIS codes** 220.4830; 220.1250; 300.6340

收稿日期: 2012-02-16; 收到修改稿日期: 2012-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(60878052,60938002)、中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目(Y00232Q100)、应用光学国家重点实验室开放课题(Y1Q03FQ113)和吉林省科技发展计划(20100338)资助课题。

作者简介: 高 静(1986—),女,硕士研究生,主要从事近红外光谱分析仪器光学设计方面的研究。

E-mail: gaojing986@126.com

导师简介: 卢启鹏(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事现代光谱技术与光谱仪器等方面的研究。

E-mail: luqipeng@126.com(通信联系人)(中国光学学会会员号: 1309129)

## 1 引言

血液生化分析是健康诊断最基本的手段之一。近红外光谱技术以无损伤、快速和多组分同时分析等特点,在农业、食品和医学等领域得到了广泛的应用<sup>[1~5]</sup>,而且是血液无创生化分析能够获得应用的最具潜力的方法之一<sup>[6~9]</sup>。但是,国内外学者在此领域研究了二十余年,仍未能实现人体血液生化指标无创检测的临床应用<sup>[10]</sup>。其中一大问题在于人体为漫射体,光经过人体组织后能量分散,而且血液生化成分含量较低,导致吸收光谱信号微弱,降低了测量精度,给无创检测带来了巨大障碍。若要精确检测血液生化成分信息,需要信噪比非常高的仪器。因此,大通量、高信噪比的近红外光谱仪是该技术在临床上得以实现的基础和前提。

通常用于提高光谱仪器信噪比的方法是增强光信号强度或者降低仪器噪声。而增强光信号强度可以通过提高光源辐射亮度或仪器装置对光信号的聚焦收集能力来实现。根据椭球反射镜的聚光特性,设计漫反射光收集装置。利用光线追迹与像点位置分析方法研究了椭球反射镜的集光效率,优化得到光能利用率较高的非球面结构。通过与常规无收集装置对比分析,验证了设计的椭球反射镜具有较强的聚光能力,获得了较好的优化结果。

## 2 系统光学设计及结构优化

对于本文研究的纯聚光要求的系统,任何利用几何成像原理的设计远未达到理论上的集光能力,只有放弃成像要求才有可能获得理想的结果,这样的光学设计问题属于非成像光学的范畴。与传统成像光学不同,非成像光学设计所追求的并不是如何在焦平面上获得质量清晰的图像<sup>[11]</sup>,在设计过程中,非成像光学不考虑或很少考虑像差对系统性能的影响,而是将光能利用率作为系统的评价标准。因此,本文在进行系统光学设计时,主要从光能利用率的角度来优化系统结构。

系统中,经过分光后的单色光入射到人体测量部位上,由椭球反射镜将携带血液光谱信息的漫反射光收集至探测器内,如图1所示。

由于手指外露,检测方便,而且指端皮肤浅表毛细血管网丰富,其他体液成分如细胞色素、肌血球素的干扰较少,常用于光谱的漫反射式或透射式测量<sup>[12]</sup>。因此,本文选择手指作为测量部位。

系统所用的椭球反射镜是在椭球的两个焦面处

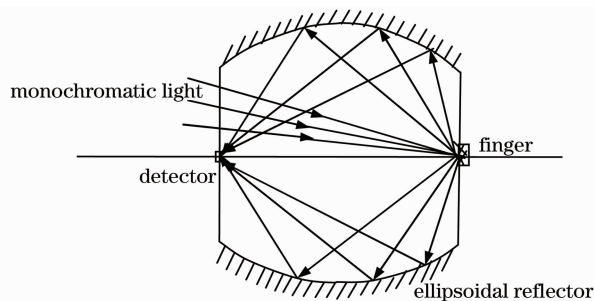


图1 系统光路示意图

Fig. 1 Optical path of the system

截断,选取椭球面的中间部分而成。将探测器和手指分别置于椭球反射镜的左右焦点处,探测器接收面直径为3 mm,元件封装外径为14 mm。

手指漫反射光辐射角度大且能量分散,若采用透镜聚焦效果不佳,难以将光高效地收集到探测器上。而由椭球反射镜的几何特点可知,该结构具有相对较好的聚光性能。因此,选择椭球反射镜作为光能收集装置,并从光能利用率角度出发,优化设计椭球初始结构。

### 2.1 像点强度和位置分析

探测器和手指分别位于椭球反射镜的左右焦点处,根据椭球曲面的几何知识,得知从一个焦点出射的光线一定会聚到另一个焦点上,所以该装置有助于提高系统对光线的收集能力<sup>[13~17]</sup>。但是,偏离椭球右焦点发出的漫反射光线并不会聚到左焦点上,而是偏移一定距离。因此,有必要讨论经椭球镜反射后的像点分布。

椭球面是由椭圆绕其长轴旋转所得,如图2所示,设椭球面方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2 + z^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

式中  $a$ 、 $b$  分别为椭球面的长、短轴半径。设  $c$  为焦点到原点的距离,则左焦点为  $F(-c, 0, 0)$ , 右焦点为  $F'(c, 0, 0)$ 。

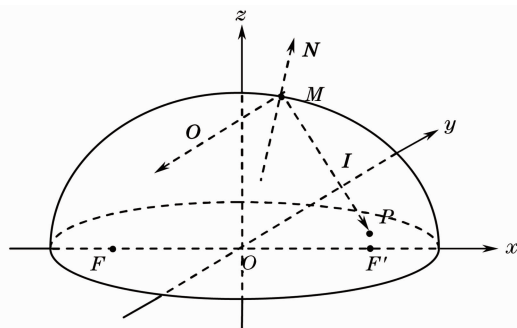


图2 椭球面几何图

Fig. 2 Geometric drawing of ellipsoid

假设椭球面反射无光能量损失,并设手指表面为朗伯辐射体,漫反射光强空间分布为

$$I_\theta = I_0 \cos \theta, \quad (2)$$

式中  $I_0$  为反射面在法线方向上的光强,  $I_\theta$  为与法线成任意角度  $\theta$  方向上的光强。

设手指表面上的任意一点为  $P(c, y_1, z_1)$ , 椭球面上任意反射点为  $M(x_0, y_0, z_0)$ 。令入射光线反向向量为  $\mathbf{I} = (I_x, I_y, I_z)$ , 则光线与手指表面法线夹角的余弦值为

$$\cos \theta = \frac{I_x}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}}. \quad (3)$$

由(2)式得出该入射方向光线的辐射强度为

$$I_\theta = \frac{I_0 I_x}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}}, \quad (4)$$

式中

$$I_x = c - x_0, \quad I_y = y_1 - y_0, \quad I_z = z_1 - z_0. \quad (5)$$

根据椭球面方程(1)式,得到反射点处法向量  $\mathbf{N} = (N_x, N_y, N_z)$ , 其中

$$N_x = b^2 x_0, \quad N_y = a^2 y_0, \quad N_z = a^2 z_0. \quad (6)$$

设反射光线方向向量为  $\mathbf{O} = (O_x, O_y, 1)$ , 根据反射

定律得到

$$\begin{vmatrix} O_x & O_y & 1 \\ I_x & I_y & I_z \\ N_x & N_y & N_z \end{vmatrix} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{I_x N_x + I_y N_y + I_z N_z}{\sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}} = \frac{O_x N_x + O_y N_y + N_z}{\sqrt{O_x^2 + O_y^2 + 1}}. \quad (8)$$

反射光线与左焦面  $x = -c$  的交点为待求的像点位置坐标  $(y, z)$ , 得出

$$\begin{cases} y = y_0 - \frac{O_y(c + x_0)}{O_x} \\ z = z_0 - \frac{c + x_0}{O_x} \end{cases}. \quad (9)$$

通过(3)~(9)式,能够计算出出射光线与左焦面相交的位置,并确定出像斑大小,可以将此作为椭球反射镜光能利用率的分析方法之一;由于假设椭球镜反射无光吸收损失,那么入射光线的强度即为对应像点的强度,进而获得像面上一定范围内聚焦通量值。

### 2.2 光能利用率研究

椭球结构参数不同时,对手指漫反射光的聚焦效果也不一样。根据使用条件,在研究椭球反射镜光能

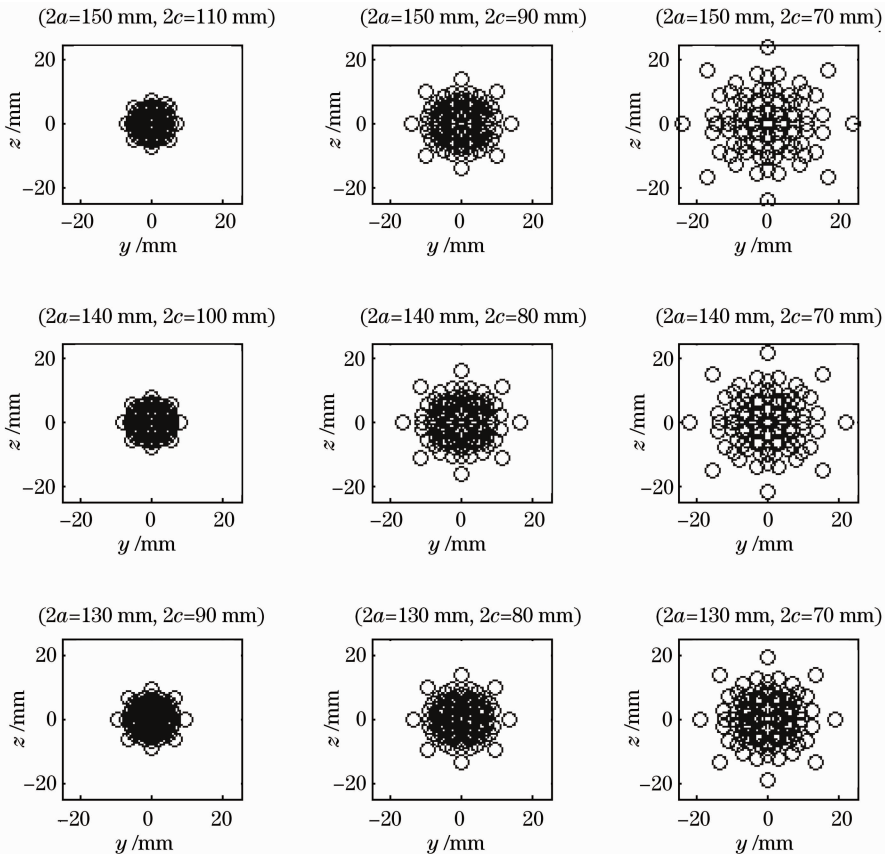


图3 左焦面上的像点位置分布

Fig. 3 Distributions of image points on the left focal plane

利用率时,设手指漫反射表面为直径 10 mm 的圆形朗伯辐射面光源,探测器接收面直径为 3 mm。考虑到实验装置大小的限制,令椭球两焦点距离不大于 110 mm。由图 1 可知,将探测器固定在焦面处,并使单色光束进入椭球镜,椭球口径大小是有限制的,令长轴长与两焦点距离值之差不小于 30 mm。

根据 2.1 节像点位置分析方法,在圆形面光源的边缘处、椭球面与任意两个垂直截面相交的圆上分别均匀地选取 8 个离散点,得到像点位置随椭球长轴长和两焦点距离变化分布情况,如图 3 所示。其中  $2a$  表示椭球镜长轴长, $2c$  表示两焦点距离。

从图 3 中看出椭球反射镜成放大的像,但是对发散光线仍具有会聚作用;当两焦点距离相同时,长轴长越小,则像斑越小,即聚光性能越好;当长轴长相同时,两焦点距离越大,则像斑越小,即聚光性能越好。因此,选择长轴长短、两焦点距离大的椭球镜时,其聚光效果较好。根据前面椭球镜口径及装置大小的限制条件,初步确定椭球镜的结构参数为长轴长  $2a=110\text{ mm}+30\text{ mm}=140\text{ mm}$ ,两焦点距离  $2c=110\text{ mm}$ 。

限定  $y, z$  的范围为  $(-10, 10)$ , 优化得到满足椭球大小约束条件的结构参数如表 1 所示。由表 1 得出,像点位置分布范围较小,即像斑较小时的椭球镜结构参数为长轴长  $2a=140\text{ mm}$ ,两焦点距离  $2c=110\text{ mm}$ ,与图 3 分析出的结果是一致的。

表 1 椭球反射镜结构优化结果

Table 1 Optimized structures of ellipsoidal reflector

| $2c/\text{mm}$ | $2a/\text{mm}$ | $\max( y ,  z )/\text{mm}$ |
|----------------|----------------|----------------------------|
| 70             | 100            | 9.30                       |
| 80             | 110            | 7.78                       |
| 90             | 120            | 6.69                       |
| 100            | 130            | 5.87                       |
| 90             | 130            | 9.18                       |
| 110            | 140            | 5.24                       |
| 100            | 140            | 8.04                       |
| 110            | 150            | 7.15                       |
| 110            | 160            | 9.11                       |

为了准确地分析不同结构时椭球聚焦光能变化,采用光线追迹的方法进行仿真计算,如表 2 所示,表中“—”表示长轴长与两焦点距离值相差小于 30 mm,椭球口径偏小,不作讨论。

由表 2 得到:

- 1) 在椭球反射镜长轴长不变的条件下,当两焦点距离增加时,光能利用率也随之变大;
- 2) 在椭球反射镜两焦点距离不变的条件下,当

长轴长增加时,光能利用率则随之变小;

3) 当椭球反射镜的长轴长越小,且两焦点距离越大时,光能利用率越大。

表 2 椭球反射镜不同  $a, c$  下的光能利用率(单位: %)

Table 2 Light energy utilization efficiency of different ellipsoidal reflectors (unit: %)

| $2c/\text{mm}$ | $2a/\text{mm}$ |      |      |      |
|----------------|----------------|------|------|------|
|                | 120            | 130  | 140  | 150  |
| 40             | 2.98           | 2.60 | 2.29 | 2.03 |
| 50             | 4.20           | 3.70 | 3.29 | 2.95 |
| 60             | 5.47           | 4.87 | 4.36 | 3.91 |
| 70             | 6.63           | 6.03 | 5.45 | 4.94 |
| 80             | 7.59           | 7.04 | 6.47 | 5.95 |
| 90             | 8.27           | 7.82 | 7.35 | 6.84 |
| 100            | —              | 8.40 | 7.99 | 7.58 |
| 110            | —              | —    | 8.47 | 8.14 |

比较图 3、表 1 和表 2,虽然分析的方法不同,但得出的结论是一致的。综上,最终确定椭球反射镜结构参数为  $2a=140\text{ mm}, 2c=110\text{ mm}$ 。在此结构下,光能利用率为 8.47%,且辐照度分布如图 4 所示。

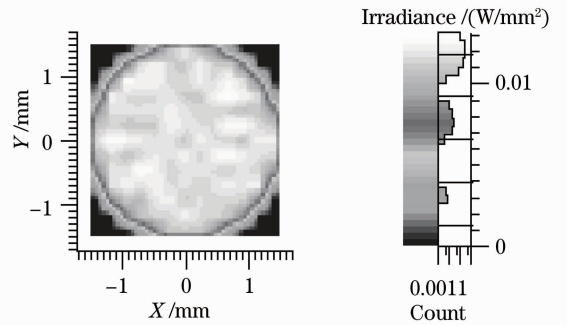


图 4 椭球反射镜辐照度分布

Fig. 4 Irradiance of ellipsoidal reflector

### 2.3 与无收集装置光学系统的对比

为了检测本系统加入椭球反射镜后对漫反射光的收集效果变化,仿真计算光学系统中无收集装置时光能利用率的大小。当无收集装置时,经过分光后的单色光入射到手指上,由探测器直接接收手指漫反射光。与前面一致,设手指漫反射表面为直径 10 mm 的圆形朗伯辐射面光源,同时也设置探测器接收面直径为 3 mm。通过软件建模,模拟探测器与手指表面距离为 10 mm、倾斜角度不同时光能利用率变化,如表 3 所示。由于当探测器倾斜角度为  $0^\circ$  时对入射光的遮挡较大,而  $15^\circ$  时遮挡影响较小,所以表中以  $15^\circ$  作为起始值。

由表 3 看出,装置的光能利用率随探测器倾角的减小而增大。当探测器在垂直方向左倾斜  $15^\circ$

时,无收集装置的光能利用率较大,为 1.74%,图 5 为对应的辐照度分布。

表 3 探测器倾角不同的光能利用率

Table 3 Light energy utilization efficiency of different detector inclination angles

| Degree of detector tilted to the left / (°) | 15   | 25   | 35   | 45   | 55   | 65   | 75   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Light utilization efficiency / %            | 1.74 | 1.71 | 1.64 | 1.49 | 1.34 | 1.08 | 0.71 |

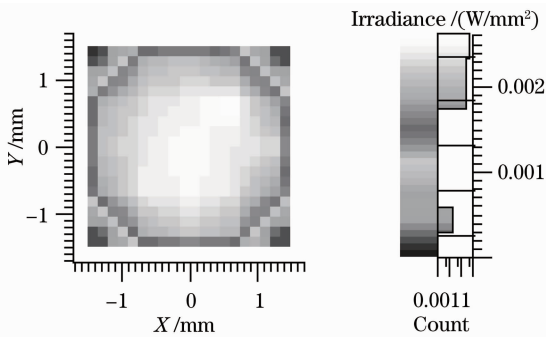


图 5 无光学收集装置辐照度分布

Fig. 5 Irradiance of non-optical collection device

通过以上分析,得出在光学系统中加入椭球反射镜后的光能利用率较大,比常规无收集装置的光能利用率提高了近 5 倍,增强了仪器检测微弱光谱信号的能力,有助于提高仪器信噪比。

### 3 结 论

对应用在近红外无创生化分析中光谱仪的光学系统部分进行了研究。为了能高效地收集人体漫反射光,采用光线追迹和像点位置分析方法,得到椭球反射镜的优化结构。仿真结果表明,光学系统中加入椭球反射镜的光能利用率比常规无收集装置时提高了近 5 倍,证实了椭球反射镜在此类光学系统中具有一定的优势。这为增强仪器检测血液吸收光谱信号的能力提供了一种可行的方法。

### 参 考 文 献

- Sun Guangming, Liu Fei, Zhang Fan *et al.*. Fast determination of proline in herbicide-stressed oilseed rape leaves based on near infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1192~1196
- 孙光明,刘 飞,张 帆等. 基于近红外光谱技术检测除草剂胁迫下油菜叶片中脯氨酸含量的方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1192~1196
- Huang Furong, Luo Yunhan, Zheng Shifu *et al.*. Near-infrared spectroscopic analysis and model optimization on cholesterol and triglyceride in whole blood [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1030001
- 黄富荣,罗云瀚,郑仕富等. 全血胆固醇、甘油三酯近红外光谱分析与模型优化[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1030001

- Haiqing Yang, Boyan Kuang, Abdul Mounem Mouazen. In situ determination of growing stages and harvest time of tomato (*lycopersicon esculentum*) fruits using fiber-optic visible-near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy[J]. *Appl. Spectrosc.*, 2011, **65**(8): 931~938
- Guo Weiliang, Wang Dan, Song Jia *et al.*. Simultaneous and rapid quantitative analysis of four components in cordyceps militaris mycelium powder using near infrared spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0230002
- 郭伟良,王 丹,宋 佳等. 近红外光谱法同时快速定量分析蛹虫草菌丝体中 4 种有效成分[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0230002
- Li Gang, Zhao Jing, Li Jiaxing *et al.*. Visible-infrared reflectance spectroscopy applied in rapid screen of diseases[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0317001
- 李 刚,赵 静,李家星等. 可见-近红外反射光谱用于疾病快速筛查[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0317001
- J. J. Burmeister, M. A. Arnold. Evaluation of measurement sites for noninvasive blood glucose sensing with near-infrared transmission spectroscopy[J]. *Clinical Chem.*, 1999, **45**(9): 1621~1627
- Chen Xingdan. Possibility of noninvasive clinical biochemical examination by near infrared spectroscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(5): 759~763
- 陈星旦. 近红外光谱无创生化检验的可能性[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(5): 759~763
- Li Yaping, Zhang Guangjun, Li Qingbo. Application of O2-PLS in experimental study on non-invasive measurement of blood glucose[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 854~860
- 李亚萍,张广军,李庆波. 基于 O2-PLS 方法的血糖无损检测实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 854~860
- V. Saptari, K. Youcef-Toumi. Design of a mechanical-tunable filter spectrometer for noninvasive glucose measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(13): 2680~2688
- Ding Haiquan, Lu Qipeng, Peng Zhongqi *et al.*. Progress in noninvasive biochemical examination by near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(8): 2107~2110
- 丁海泉,卢启鹏,彭中琦等. 近红外光谱技术用于无创生化检验研究的进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(8): 2107~2110
- R. Winston. Nonimaging Optics [M]. Burlington: Elsevier Academic Press, 2005. 44~47
- Chen Lingling. The Preliminary Study of Near Infrared Non-Invasive Blood Glucose Detection [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2010. 18
- 陈玲玲. 近红外无创血糖浓度检测技术的初步研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2010. 18
- R. Winston. Cone collectors for finite sources[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(5): 688~689
- H. Rehn. Optical properties of elliptical reflectors[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(7): 1480~1488
- Qin Tairan, Qu Anlian. Design of elliptical reflector based on fluorescence microscope monochromatic source[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(6): 720~723
- 秦天然,瞿安连. 基于荧光显微镜单色光源系统的椭球反射镜的设计[J]. *应用光学*, 2007, **28**(6): 720~723
- I. N. Bukreeva, S. B. Dabagov, S. Lagomarsino. Efficiency of an elliptically shaped X-ray mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(34): 6270~6277
- A. Feldman. High throughput illumination systems for sola simulators and photoresist exposure [C]. *SPIE*, 2010, **7785**: 77850H

栏目编辑: 王晓琰