doi:10.3788/gzxb20164508.0822002

光谱仪光源双光束准直的自由曲面透镜

王晓朵^{1,2,4},刘华¹,李云鹏³,全向前^{1,2},卢振武¹

(1中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,长春 130033)
 (2中国科学院大学,北京 100000)
 (3中国刑事警察学院,沈阳 110000)
 (4中国科学院沈阳自动化研究所,沈阳 110000)

摘 要:为了使光谱仪在分辨率基本不变的同时增宽工作光谱范围,利用非成像原理设计了自由曲面透镜,将光源发出的宽工作谱段的光束准直为两束波长不同、方向不同的平行光,实现探测器上光谱的折叠分布.首先,根据两束入射光线经自由曲面折射前、后的矢量关系,建立自由曲面上点坐标的一阶偏微分方程组;然后,采用 Runge-Kutta 法对偏微分方程组进行数值差分求解,得到自由曲面离散采样点,进而构建得到自由曲面透镜,将自有曲面透镜导入 ZEMAX 软件中对光源的双光束准直进行模拟,在 Tracepro 软件中进行光线追迹分析其照度分布;最后,将自由曲面透镜应用于近红外光谱仪中,将波段为 800~2 400 nm 的光源准直为两束波长分别为 800~1 600 nm 和 1600~2 400 nm 的方向不同的平行 光束,经单个光栅色散后由成像透镜组成像在探测器表面,形成两组相互平行且首尾相连的折叠光谱, 光谱仪的分辨率优于 10 nm.结果表明,采用该自由曲面透镜可以同时实现光谱仪分离介辨率和宽工作 光谱范围,且使光谱仪的结构更加紧凑.

关键词:近红外光谱仪;自由曲面;双光束准直;偏微分方程组;Runge-Kutta法 **中图分类号:**TN202; TN21 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4213(2016)08-0822002-6

Freeform Lens for Two Beams Collimating of a Spectrometer Source

WANG Xiao-duo^{1,2,4}, LIU Hua¹, LI Yun-peng³, QUAN Xiang-qian^{1,2}, LU Zhen-wu¹ (1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China) (3 National Police University of China, Shenyang 110000, China)
(4 Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110000, China)

Abstract: To extend the working spectral range of spectrometer while keeping the resolution the same, a freeform lens was designed based on non-imaging principle, which could collimate the broadband source light into two beams with different wavelengths in different direction, to achieve the spectrum-fold on a two demention array detector. First of all, a first-order partial differential equations set was obtained according to the vector relationship between the incident rays and the refractive rays on the freeform surface. Then Runge-Kutta methods was adopted to get the numerical solution of the partial differential equations which are the discrete points of the freeform surface, and the freeform lens was constructed. The two beam collimating of the source was simulated in ZEMAX software, and the irradiance maps of the two collimated beams were simulated in Tracepro software. Finally, the freeform lens was appllied to a spectrometer to collimate a source with wavelength ranging from 800 nm to 2 400 nm into two beams with wavelength from 800 nm to 1 600 nm and from 1 600 nm to 2 400 nm in different direction. After

收稿日期:2016-02-23;录用日期:2016-04-20

http://www.photon.ac.cn

0822002-1

基金项目:国家自然科学基金(No. 61137001)和吉林省中青年科技创新领军人才及团队项目(No. 20160519021JH)资助

第一作者:王晓朵(1988-),女,博士研究生,主要研究方向为光谱仪技术. Email:wangxdsxs@126.com

与 师:卢振武(1955-),男,研究员,博导,主要研究方向为衍射光学及其应用. Email:luzw@ciomp. ac. cn

通讯作者:刘华(1976一),女,研究员,博士,主要研究方向为光学设计、衍射光学. Email:liuhua_rain@aliyun. com

being dispersed by one grating and focused by imaging lens, two paralle and end to end spectra were distributed in the detector, and the spectral resolution was better than 10nm. The simulation results show that, by using this kind of freeform lens, both high resolution and wide working wavelength range can be achieved in one spectrometer, and the structure of the spectrometer becomes much more compact. **Key words**: Near-infrared spectrometer; Freeform surface; Two-beam collimating; Partial differential equations set; Runge-Kutta method

OCIS Codes: 220.2740; 300.6340; 120.1680

0 引言

近红外光谱区主要记录了含氢基团(如 C-H、N-H、O-H 键等)振动的合频与倍频吸收等信息,通过分 析物质的近红外光谱,可以获得丰富的物质结构和组成信息.随着化学计量学和计算机技术的发展,近红外 光谱仪的应用已经从农业快速扩展到医药、石油化工、 纺织业和国防等领域,成为质量控制和品质分析的重 要手段^[1-3].在很多实际应用中,要求光谱仪有较高的 光谱分辨率的同时,还要有很宽的工作光谱范围.然 而,目前市场上已有的光栅光谱仪普遍存在着光谱分 辨率与工作光谱范围之间的矛盾,即在其他参量不变 的情况下,要提高光谱分辨率,必须以减小工作光谱范 围为代价,反之亦然^[45].

为解决这一矛盾,通常的方法为增大探测器尺寸. 例如,美国 Ocean Optics 公司为了在保持 NIRQuest256-2.5 型号光谱仪的工作光谱范围不变的 同时提高其分辨率,将其探测器像元数由256变为 512,进而研发出 NIRQuest512-2.5 型近红外光谱仪, 然而,由于探测器价格昂贵,这种方法将导致光谱仪成 本大大增加,不利于光谱仪的推广使用.2003年,国内 复旦大学陈良尧等首先提出了通过多个子光栅将光谱 在二维面阵探测器上进行多重折叠的方法[6-7],并于 2011年将采用该方法研发的成像光谱仪应用于薄膜 制作过程的光学监控中^[8].该方法克服了传统光谱仪 中探测器尺寸的限制,扩展了光谱仪的工作光谱范围. 但是,当子光栅的数目增多时,子光栅之间的相对夹角 会很小,装调难度增加,装调引入的误差也会随之增 加.多个子光栅也会引入大量的杂散光,使仪器结构更 加复杂、数据处理难度增大.

为解决这一问题,本文设计了自由曲面透镜,将光 源发出的入射光准直为两束波长不同、方向不同的平 行光束,仅利用一个光栅就可以将整个工作谱段折叠 为两列子光谱分布在探测器上,简化了光谱结构,提高 了光谱仪性能.由于光学设计软件的限制,本文采用非 成像原理对自由曲面进行设计,使光线经自由曲面透 镜后按照指定的方向分布^[9-10].

1 自由曲面双光束准直原理

利用非成像原理,通过一个自由曲面透镜将光源

发出的宽谱带光波准直为两束波长不同、方向不同的 平行光束.设光源光谱范围为 $\lambda_1 \sim \lambda_3$.将光源发出的光 波分为两个等宽的谱段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 和 $\lambda_2 \sim \lambda_3$,分别用谱段 A和谱段B表示.对自由曲面进行特殊设计,使自由曲 面上半部分($y \ge 0$,光轴与y轴垂直)对波段B进行准 直,准直光束与光轴夹角为 β ;自由曲面下半部分(y < 0)对波段A进行准直,准直光束与光轴的夹角为 α .当 $\alpha \neq \beta$ 时,A和B两个子光束以不同的角度从自由曲面 出射,从而实现光源的双光束准直,如图1.由于自由 曲面上、下两部分准直后平行光束的方向不同,所以 上、下两部分的自由曲面是不对称的.此外,由于自由 曲面上不同点对应的折射后的光线不具有旋转对称 性,导致自由曲面的上、下部分各为非旋转对称.



图 1 自由曲面双光束准直原理 Fig. 1 Schematic of two light beams collimated by free-from lens

2 自由曲面光学数学模型

传统的自由曲面设计方法通常需要首先设置自由 曲面的初始面型,然后利用光学设计软件对曲面面型 进行反复的优化设计,最终得到满足要求的设计结果, 这种方法费时费力且往往需要设计者具有丰富的经 验^[11-14].为了简化自由曲面设计过程,利用非成像原理 对自由曲面透镜进行设计,通过自由曲面上入射和出 射光束的矢量关系建立偏微分方程组,通过对偏微分 方程组进行数值差分求解得到自由曲面的离散点,进 而构建自由曲面,实现光源的特殊准直.

2.1 方程组的构建

假设入射光源为点光源,且位于坐标原点.自由曲 面透镜的入射面为球面,其球心与坐标原点重合,出射 面为自由曲面,接收面为与z轴垂直的平面,则光线经 过自由曲面透镜的几何示意图如图 2. 从光源发出的 一条光线经入射面后入射到自由曲面上,与自由曲面 交于点P(P_x, P_y, P_z),经自由曲面折射后的出射光线



图 2 自由曲面透镜几何示意图

Fig. 2 The geometrical layout of the freeform lens 与接收面交于点 $T(t_x, t_y, t_z)$. 当点 P 的球坐标表示为 $P(\rho(\theta, \varphi), \theta, \varphi)$ 时,可以推得 $P_x = \rho \sin \varphi \cos \theta, P_y =$ $\rho \sin \varphi \sin \theta, P_z = \rho \cos \varphi$. $I = (\sin \varphi \cos \theta, \sin \varphi \sin \theta, \cos \varphi)$ 为入射光线的单位方向向量, O 为出射光线的单位方 向向量, N 为自由曲面在点 P 处的单位法向量. 设点 P 处的位置矢量为 P,其关于 θ 和 φ 的偏导数表示为 P_{φ} 与 P_{θ} .可知向量 P_{φ} 与向量 P_{θ} 处于自由曲面在点 P 处 的切平面内,且相互正交,推得向量 N 的表达式为

$$\mathbf{N} = \frac{\mathbf{P}_{\varphi} \times \mathbf{P}_{\theta}}{|\mathbf{P}_{\varphi} \times \mathbf{P}_{\theta}|} \tag{1}$$

设 $N = (N_x e_x, N_y e_y, N_z e_z), \rho_\theta 与 \rho_\varphi 为 \rho(\theta, \varphi) 关于 \theta 和$ $<math>\varphi$ 的一阶偏导数,则得到向量 N 的三个分量^[15]为

$$\begin{cases} N_{x} = \frac{-\rho_{\theta}\sin\theta + \rho_{\varphi}\sin\varphi\cos\varphi\cos\theta - \rho\sin^{2}\varphi\cos\theta}{\sqrt{\rho_{\theta}^{2} + \rho_{\varphi}^{2}\sin^{2}\varphi + \rho^{2}\sin^{2}\varphi}} \\ N_{y} = \frac{\rho_{\theta}\cos\theta + \rho_{\varphi}\sin\varphi\cos\varphi\sin\theta - \rho\sin^{2}\varphi\sin\theta}{\sqrt{\rho_{\theta}^{2} + \rho_{\varphi}^{2}\sin^{2}\varphi + \rho^{2}\sin^{2}\varphi}} \\ N_{z} = \frac{-\rho_{\theta}\sin^{2}\theta - \rho\sin\varphi\cos\theta}{\sqrt{\rho_{\theta}^{2} + \rho_{\varphi}^{2}\sin^{2}\varphi + \rho^{2}\sin^{2}\varphi}} \\ \text{Rgsatisfies a statistical statist$$

式中, n_i 为自由曲面透镜的折射率(透镜置于空气中). 将矢量 $O = (O_x e_x, O_y e_y, O_z e_z)$ 和 $I = (I_x e_x, I_y e_y, I_z e_z)$ 带 入式(3)便可以得到两个关于P点坐标的一阶偏微分 方程^[12],即

$$\begin{cases} \rho_{\varphi} = \rho \frac{\sin \varphi(O_{z} - n_{l}I_{z}) - \cos \varphi[\cos \theta(O_{x} - n_{l}I_{x}) + \sin \theta(O_{y} - n_{l}I_{y})]}{\cos \varphi(O_{z} - n_{l}I_{z}) + \sin \varphi[\cos \theta(O_{x} - n_{l}I_{x}) + \sin \theta(O_{y} - n_{l}I_{y})]} \\ \rho_{\theta} = \rho \frac{\sin \varphi(\sin \theta(O_{x} - n_{l}I_{x}) - \cos \theta(O_{y} - n_{l}I_{y}))}{\cos \varphi(O_{z} - n_{l}I_{z}) + \sin \varphi[\cos \theta(O_{x} - n_{l}I_{x}) + \sin \theta(O_{y} - n_{l}I_{y})]} \end{cases}$$
(4)

求解式(4)需要计算得到出射光线的单位矢量 O的表达式.设准直光束的接收面与 z 轴的交点为(0, 0, z),则自由曲面的上、下部分的出射光线的矢量 P_{T} 可以分别表示为

$$\boldsymbol{P}_{\text{T-upper}} = (0, (z - P_z) \tan \beta, z - P_z) \quad (y \ge 0) \quad (5)$$

$$\boldsymbol{P}_{\text{T-lower}} = (0, (z - P_z) \tan \alpha, z - P_z) \quad (y \leq 0) \quad (6)$$

通常 在 激 光 和 发 光 二 极 管 (Light Emitting Diode, LED) 二次配光的自由曲面设计中,需要根据能量守恒 定律建立自由曲面上点坐标与照明面上点坐标之间的 关系,进而构建偏微分方程组.通过简单的几何光学计 算把点 P 和点 T 联系起来,大大减少了计算量,节约 了计算时间.

根据式(5)和式(6)可以计算得到自由曲面上、下 部分出射光线的单位矢量分别为

$$\boldsymbol{O}_{upper} = \left(0, \frac{\tan\beta}{\sqrt{1+\tan^2\beta}}, \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\beta}}\right) \quad (y \ge 0) \quad (7)$$

$$\boldsymbol{O}_{\text{lower}} = \left(0, \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}, \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}\right) \quad (y \leq 0) \quad (8)$$

将式(7)或式(8)中相应的 O_x , O_y , O_x 带入式(4)中 进行偏微分方程组求解,求得点 P的球坐标 $\rho(\theta, \varphi)$,便 可得到点 P在直角坐标系中的坐标表达式.

2.2 偏微分方程组求解

由于偏微分方程组式(5)的精确解很难求得,采用

差分法求解得到该一阶偏微分方程组的数值解.求解 偏微分方程最常采用的方法有 Euler 法和 Runge-Kutta 法.与 Euler 方法相比,Runge-Kutta 法求得的数 值解计算准确度更高.通常 Runge-Kutta 法的阶数越 高,计算准确度越高,但计算的复杂程度与计算量也随 之增大^[17],所以采用应用最早、最广泛的四阶 Runge-Kutta 法对偏微分方程组进行求解.

当偏微分方程为 y' = f(x, y)时,四阶 Runge-Kutta 方法的计算公式为

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + k_2 + k_3 + k_4), n = 0, 1, \cdots, N - 1\\ k_1 = f(x_n, y_n)\\ k_2 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1) \\ k_3 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2)\\ k_4 = f(x_n + h, y_n + hk_3) \end{cases}$$
(9)

式中,h 为将变量区间 N 等分时所对应的步长.当 n=0时, $y_n = y_0$ 称之为初始值,设自由曲面与 z 轴的交点 (0,0, z_0)为起始点.式(9)所示的 Runge-Kutta 法适用 于解单个的一阶偏微分方程,而要得到自由曲面的数 值解需要解一个偏微分方程组,这就需要对 Runge-Kutta 方法稍作变化,将两个偏微分方程进行嵌套求 解,具体的算法步骤如图 3.





图 3 中, φ 表示入射光线与 z 轴的夹角,其对应的 步长为 s; θ 表示入射光线在 XY 平面的投影与 x 轴的 夹角,其对应的步长为 t. 求解方法为:首先在初始值为 P₀ 的情况下,设 $\theta=0$,对式(4)中第一个偏微分方程求 数值解,得到的数值解作为第二个方程的初始值对第 二个偏微分方程式求解,得到的值 r_n 便是整个方程组 的解 ρ ,进而计算得到此时的自由曲面点坐标 P (P_x, P_x, P_x).将 ρ 作为下一次循环中第一个方程式的初始 值,如此循环若干次,便可以得到式(4)的数值解,该数 值解的集合便是自由曲面的离散采样点,对其进行拟 合便可得到平滑的自由曲面.

3 自由曲面透镜的构建与分析

3.1 透镜构建参量及模型

表1为自由曲面透镜的主要参量,其中自由曲面 上半部分对谱段B进行准直,中心波长为1200 nm,准 直后的光束与z轴夹角为一8.03°,对应的 θ 角范围为 0°~180°;自由曲面下半部分对谱段A进行准直,中心 波长为2000 nm,准直光束与z轴夹角为6.11°(以光 线顺时针旋转到法线的角度为正),对应的 θ 角范围为 180°~360°.自由曲面上、下两部分所对应的角度 φ 的 范围是相同的,其值由透镜的数值孔径决定,在本文中 为0°~12.7°.按照这些参量对式(4)进行求解,得到的 两组自由曲面的离散采样点.然后采用现有的曲面建 模算法,在 CAD 软件中对离散点进行非均匀有理 B样 条(Non-Uniform Rational B-Splines, NURBS)拟合,最 终构建得到的自由曲面透镜形状如图4.

表 1 自由曲面透镜参量设置 Table 1 Parameters of the free-from lens

Sample	Value
Band A/mm	800~1600
Band B/mm	$1600 \sim 2400$
Numerical Aperture	0.22
Radius of spherical surface/mm	30
Start point of freeform surface/mm	(0,0,35)
Material of lens	N-BK7



图4 在 CAD 中构建的自由曲面透镜

Fig. 4 The freeform lens constructed in CAD software 表 2 为当自由曲面上、下两个半面的采样点分别

为 500×1000 时对应的拟合平均距离偏差值与最大距。 离偏差,其拟合误差均在允许的范围内.

表 2 采样点为 500×1000 时的拟合误差

Table 2 Fitting error when the sampling points are 500×1000

	y≥0	y<0
Average distance deviation/mm	0.000697	0.0006837
Maximum deviation/mm	0.005886	0.0057694

3.2 光束整形结果分析

将利用解方程组得到的离散采样点构建的自由曲面导入光学设计软件 ZEMAX 中进行双光束准直,模拟图如图 5. 从图中可以看出,光谱段 A 和光谱段 B 分别以不同的方向出射,实现了利用一个自由曲面透镜将从同一个光源发出的光准直为两束波长不同、方向不同的平行光束的设计目标. 另外可以看出准直后的光谱段A和光谱段B在目标面上相互重叠,这样可以





一定程度上减小目标面的尺寸,使系统结构更加紧凑.

从图 4 自由曲面透镜的模型可以看出,自由曲面 上、下两个半面在拼接处并不连续(如虚线框处所示), 这会导致靠近光轴的很小角度范围内的光束不能按照 理想的光路行进,从而产生杂散光.经光学追迹软件 Tracepro 模拟,由该不连续导致的杂散光非常微弱,可 以忽略不计.图 6 为在 Tracepro 中进行光线追迹后得到 的谱段 A 和 B 在目标面上的照度分布图.从图中可以 看出谱段 A 和 B 的光斑形状均接近理想的半圆,且照 度分布非常均匀(照度均匀性约为 90%),表明该自由 曲面透镜对两束光的准直度很高.此外,可以看出,谱段 B 的光斑直径略大于谱段 A 的光斑直径,这是由于谱段 B 的准直光束的传播方向与光轴的夹角较大所致.





4 自由曲面透镜在光谱仪中的应用

若将构建的自由曲面透镜应用于近红外光谱仪中,用光栅代替目标面分别对谱段 A 和谱段 B 进行光 谱色散,然后经成像透镜成像在探测器上,则可以在探 测器上同时得到谱段 A 和谱段 B 的光谱分布图,从而 在保持光谱分辨率不变的情况下,扩宽光谱仪的工作 光谱范围.

由于探测器上两列光谱不能相互重叠,所以经自 由曲面透镜准直后的光谱段 A 和光谱段 B 不仅需要 在 YZ 平面倾斜,还需要有 XZ 平面内的倾斜.为方便 起见,设谱段 A 的准直光束只有 YZ 平面的倾斜(角度 为 β),而谱段 B 的准直光束既有 YZ 平面的倾斜(角度 为 α),也有 XZ 平面的倾斜(角度为 γ),则单位矢量 **O**_{lower}的三个分量应变为

$$\begin{cases}
O_{x} = \frac{\tan \gamma}{\sqrt{1 + \tan^{2} \gamma + \tan^{2} \alpha}} \\
O_{y} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^{2} \gamma + \tan^{2} \alpha}} \quad (y \leq 0) \quad (10) \\
O_{z} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^{2} \gamma + \tan^{2} \alpha}}
\end{cases}$$

以光纤端口作为光谱仪的光源,光纤的数值孔径 为 0. 22,直径为 100 μ m.由于光源的尺寸远远小于光 源与自由曲面透镜的距离,所以光源可以近似看作为 点光源.当 $\gamma=3^{\circ}$,其他参量的值与 3.1节中相同时,通 过解偏微分方程组得到自由曲面上、下两个半面的数 值解,然后对其进行 NURBS 拟合,最终构建得的自由 曲面透镜的模型如图 7.从图中椭圆虚线框处可以看 出,由于 $\gamma\neq0$,自由曲面上、下两部分连接处的不连续 程度大大增加.为了消除该处不连续导致的杂散光,可 以在透镜的前表面沿拼接方向镀一条带状吸收膜,使 其将该小角度范围内的光吸收.带状吸收膜的宽度约 为 0.18 mm,其吸收能量占入射能量的百分比为 1.22%.



图7 用于光谱仪的自由曲面模型

Fig. 7 The freeform lens constructed for spectrometer

根据光栅方程,选择合适的光栅倾角,可以使 A、B 两束准直光中相对应的波长以相同的衍射方向出射, 经成像透镜后在探测器上的光纤像一一对应,且谱段 A 和 谱段 B 的 光 谱 相 互 平 行. 设 光 栅 的 光 栅 常 量 为 300 groove/mm, 成像透镜的焦距为 35 mm. 图 8 为将 自由曲面透镜导入 ZEMAX 中进行光谱仪光学系统的 整体优化设计后,得到的光谱仪系统结构图.从图中可 以看出,从光源发出的宽光谱光波经自由曲面透镜准 直成为两束不同方向的平行光,这两束平行光经光栅 色散后,由成像透镜进行成像,在探测器表面上以两列 相互平行且首尾相连的光谱,实现了光谱折叠.在传统 的光谱仪中,面阵探测器在光谱色散方向的长度被充 分利用,而垂直于色散方向的宽度往往不能充分利用. 设计的光谱仪利用自由曲面透镜将两个谱段的光谱折 叠在探测器面上不同位置,在充分利用面阵探测器的 同时将光谱仪的工作光谱范围扩大一倍.根据瑞利判 据,可以得出光谱仪在 800~2 400 nm 波长范围内的 分辨率优于 10 nm. 可知通过光谱折叠的方式可以在

光谱分辨率很高的情况下大大扩宽光谱仪的工作光谱 范围.此外,两束准直光在光栅上相互重叠,使光栅刻 划面积更小,通过合适的生产方式(如铸模法)^[18-19]可 降低自由曲面的成本,同时使光谱仪结构更加紧凑.



图 8 光谱仪光学系统结构图 Fig. 8 Side view of the optical layout of the spectrometer

5 结论

本文详细介绍了实现光源双光束准直的自由曲面 透镜的原理、光学数学模型的建立及自由曲面的构建, 对由自由曲面透镜准直的双光束进行分析;最后,将该 自由曲面透镜应用于近红外光谱仪中,对宽波段光谱 进行一次折叠,实现了光谱仪的高分辨率和宽工作谱 段,且降低了光谱仪的成本.当光谱仪中探测器上光谱 折叠次数增多时,该光谱仪的优势将更加显著,使其具 有广阔的应用前景.本文在设计自由曲面时,假设入射 光源为点光源,后期的工作将致力于入射光源为扩展 光源时自由曲面的设计和模拟.

参考文献

- DELWICHE S R. WILLIAMS R H. Protein content of bulk wheat from near-infrared reflectance [J]. Cereal Chemistry, 2000. 77(1): 86-89.
- [2] LIU Yan-de. Study on methods of nondestructive measurement of sugar content and acidity in fruits using near-infrared spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 刘燕德. 水果糖度和酸度的近红外光谱无损检测研究[D]. 杭 州:浙江大学. 2006.
- [3] GAO Hong-zhi. Study on the equivalence and calibration model of different path-length NIR spectra for noninvasive biochemical sensing[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. 高洪智.近红外无创生化检测中不同光程的光谱等效性及校

正模型研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理 研究所, 2011.

- [4] LEE K, THOMPSON P K, ROLLAND P J. Broadband astigmatism-corrected[J]. Optics Express, 2010, 18 (22): 23378-23384.
- [5] LAWLER E J, LABBY E Z. HARLANDER J M, et al. Broadband, high-resolution spatial heterodyne spectrometer Czerny - Turner spectrometer [J]. Applied Optics, 2008, 47 (34): 6371-6384.
- [6] HAN Tao, NI Wei-ming, ZHOU Peng, et al. A new spectrometer using multiple gratings with a two-dimensional chargecoupled diode array detector [J]. Review of Scientific Instrument, 2003, 74(6): 2973-2976.
- [7] LIU Ming-hui, PAN Su-xing, CHEN Yue-rui, et al. Pathfolded infrared spectrometer consisting of10 sub-gratings and a two-dimensional InGaAs detector[J]. Optics Express, 2009, 17(17): 14956-14966.
- [8] CAI Qing-yuan, ZHENG Yu-xiang, ZHENG Dong-xu, et al. Application of image spectrometer to in situ infrared broadband optical monitoring for thin film deposition[J]. Optics Express, 2011, 19(14): 12969-12977.
- [9] ZHAO Xing, ZHEGN Yi, ZHANG Zan, et al. Characterization of freeform optical surfaces based on surface slope [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(7): 1957-1964. 赵星,郑义,张赞,等. 基于面型斜率的光学自由曲面表征
- [J]. 光学精密工程, 2015,23(7): 1957-1964.
 [10] ZHANG En-zhong, ZHAO Ji, JI Shi-jun, et al. Comprehensive error modeling and compensation for optical free-form surface polishing machine tool [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(6): 1587-1596.
 张恩忠,赵继,冀世军,等. 光学自由曲面研抛机床的综合误 差建模与补偿[J]. 光学精密工程, 2015, 23(6): 1587-1596.
- [11] FENG Ze-xin, HUANG Lei, GONG Ma-li, et al. Beam shaping system design using double freeform optical surfaces [J]. Optics Express, 2013. 21(12); 14728-14735.
- [12] MINANO J C, BENITEZ P, SANTAMARIA A. Free-form optics for illumination [J]. Optics Review, 2009, 16(2); 99-102.
- BRUNETON A. BAEUERLE A, WESTER R. et al. High resolution irradiance tailoring usingmultiple freeform surfaces
 [J]. Optic Express, 2013, 21(9); 10563-10571.
- [14] DING Yi, LIU Xu, ZHENG Zhen-rong, et al. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. Optics Express, 2008, 6(17): 12958-12966.
- [15] WU Reng-mao. Research on the design method of freeform illumination [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013; 20-22. 吴仍茂. 自由曲面照明设计方法的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013: 20-22.
- [16] BRUNETON A, BAEUERLE A, WESTER R, et al. Limitation of the ray mapping approach infreeform optics design[J]. Optics Letters, 2013. 38(11); 1945-1947.
- [17] DING Yi. Design of freeform optical devices and their applications in illumination systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University. 2009: 45-50, 丁毅. 自由曲面光学器件的设计及其在照明系统中的应用 [D]. 杭州:浙江大学. 2009: 45-50.
- [18] FANG F Z. CHEN Y H. ZHANG X D. et al. Nanometric cutting of single crystal silicon surfaces modified by ion implantation [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 527-530.
- [19] MICHAELI W, HESSNER S, KLAIBER F, et al. Geometrical accuracy and optical performance of injection moulded and injection-compression moulded plastic parts[J]. Annals of the CIRP, 2007, 56(1): 545-548.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61137001). the Innovation of Science and Technology in Jilin Province Youth Leading Talent and Team Project (No. 20160519021JH)

0822002-6