

全息凹面光栅和IV型环面全息光栅设计

吕 丽 军

摘要: 本文根据Namioka^[1]全息凹面光栅设计的几何理论, 叙述了Seya—型单色器全息凹面光栅设计以及IV型消象差环面全息光栅设计, 并建立了设计程序。经光线追迹计算表明, 所得到的全息光栅单色器设计, 确实提供了较为理想的象质。

一、概 述

关于全息凹面光栅的设计已由许多作者作了比较深入的探讨。R. L. Johnson^[2]详细总结了全息光栅的概念和发展。Namioka等人^{[1],[3]}论述了Seya—型单色器象差极小化的一种方法, 并且具体阐述了如何利用全息参量达到象差校正的过程。另外, 在A. Takahasi和T. katayman^[3]的文章和Namioka于1983年来长春光机所讲学报告中, 论述了如何应用最小二乘法对Seya—Namioka单色器作最优化设计。近年来, 由于非球面光学元件加工技术的提高, IV型环面全息光栅的设计和研制方面都已取得了相当可喜的进展。Lepere^[5]较早的提出了IV型环面全息光栅的设计, 由那样得到的全息光栅单色器设计, 在较宽的波段内具有较为理想的能量接收和分辨率。另外, J. Flamand^[4]和长春光机所庄夔等^[6]都作了这方面的研究, 并取得了一定的进展。

本文在Namioka等人的工作基础上, 建立了Seya—Namioka全息凹面光栅以及IV型环面全息光栅单色器的设计程序。

二、设计原理

由光程函数和费马原理, 我们得到波前象差

$$\begin{aligned} \Delta(\rho) = & (x^2/2R)F_{200} + (y^2/2R)F_{020} + (x^3/2R^2)F_{300} + (xy^2/2R^2)F_{120} \\ & + (x^4/8R^3)F_{400} + (x^2y^2/4R^3)F_{220} + (y^4/8R^3)F_{040} + \dots \end{aligned} \quad (1)$$

这里各项所表示的象差如下:

F_{200} : 离焦项

F_{020} : 象散项

F_{120} : 象散彗差项

F_{300} : 彗差项

$F_{400}, F_{040}, F_{220}$: 球差项

F_{ijk} 由二项组成:

$$F_{ijk} = M_{ijk}(r, \alpha, r', \beta) + (m\lambda/\lambda_0)H_{ijk}(r_c, \gamma, r_0, \delta) \quad (2)$$

前一项由结构参量所决定, 后一项由全息记录参量所决定。目前由于受激光记录波长的限制, 在真空紫外短波区, 全息项对象差校正仅起着小量校正作用。

1. Seya—Namioka全息凹面光栅设计

主要过程请参看Namioka^[1]的文章, 其中主要思想是使需校正的象差项在工作光谱范

围内总的积分值极小化,

$$I_{ijk} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} F_{ijk}^2 d\theta = \text{minimum} \quad (3)$$

θ_1, θ_2 是对应于波段初始和末端的光栅转角。 F_{ijk} 由(2)式所决定。决定全息记录参量的消象差条件分彗差校正型 ($f_{200}, f_{300}, f_{120}$) 和象散校正型 ($f_{200}, f_{020}, f_{300}$), 分别以(4)、(5)两式表述如下

$$\begin{cases} \sin\delta - \sin\gamma = \lambda_0/\sigma \\ f_{200}(\rho_e, \gamma) - f_{200}(\rho_D, \delta) = (\lambda_0/\sigma) \cdot A_{200} \\ f_{300}(\rho_e, \gamma) - f_{300}(\rho_D, \delta) = (\lambda_0/\sigma) A_{300} \\ f_{120}(\rho_e, \gamma) - f_{120}(\rho_D, \delta) = (\lambda_0/\sigma) A_{120} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sin\delta - \sin\gamma = \lambda_0/\sigma \\ f_{200}(\rho_e, \gamma) - f_{200}(\rho_D, \delta) = (\lambda_0/\sigma) A_{200} \\ f_{020}(\rho_e, \gamma) - f_{020}(\rho_D, \delta) = (\lambda_0/\sigma) A_{020} \\ f_{300}(\rho_e, \gamma) - f_{300}(\rho_D, \delta) = (\lambda_0/\sigma) A_{300} \end{cases} \quad (5)$$

其中 A_{ijk} 系数由Namioka^[1]一文中的(17)~(21)式所决定。 $\rho_e = R/r_e, \rho_D = R/r_D, A_{ijk} = (\sigma/\lambda) / i_{ijk}$ 。我们采用计算机数值方法求解, 用比较法在大区间内找出有解的小区间, 然后在小区间内应用平法求精确解。

2. IV型环面全息光栅设计

分析波前象差(1)式中各项可知, 离焦项对象质影响最大。因此首先必须使 F_{200} 在整个工作波段内具有极小化分布。经计算机数值运算结果表明, 除了Seya—Namioka单色器结构外(70°偏角)。在一般掠入射环面结构中, 不可能存在合理的参量解, 使 F_{200} 能在波段内的三处波长为零, 只能在二处波长为零。因此, 与机刻光栅相比, 全息校正对离焦量改善不大。

在 F_{ijk} 表达式中, 一旦确定了全息参量, F_{ijk} 与波长仅成线性关系(仅考虑全息项作用)。由于全息校正作用, 各象差曲线可能发生的变形如图1所示。从而可知, 在整个波段内, 通过恰当选择全息参量, 可以改善象散值、短波长处的彗差以及象散彗差分布值。

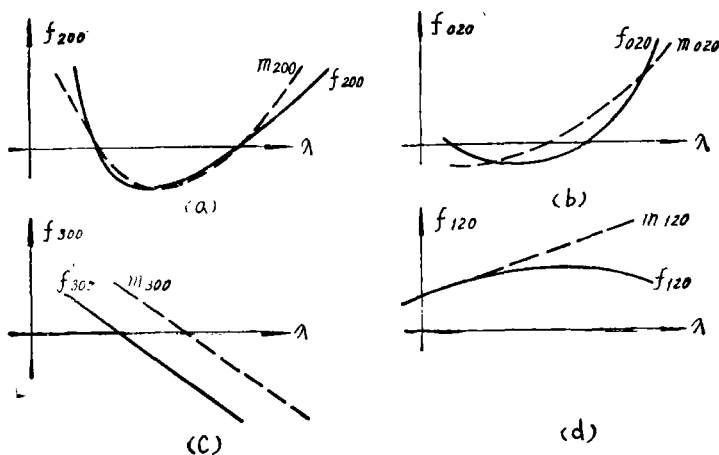


图1 象差系数曲线示意图

(a) 离焦 (b) 象散 (c) 彗差 (d) 象散彗差。虚线指机刻光栅, 实线指全息光栅。

Lepere分析了象差分布特性,提出了一套确定全息记录参量的设计准则。在本文中是按照如下准则确定全息及有关结构参量:

- ① 选择 r 、 r' 和 h_{200} 使离焦项 f_{200} 在二个波长 λ_1 、 λ_2 处极小化,在一波长 λ_3 处使 m_{300} 极小化。
- ② 选择 h_{020} 和环面弧矢半径 ρ_D 使象散 f_{200} 在二个波长 λ_4 、 λ_5 处极小化。
- ③ 选择 h_{300} 使彗差 f_{300} 在 λ_1 处极小化。

根据象差分布曲线特性,条件③在 λ_1 可能使 f_{120} 极小化(选择 h_{120}),但经计算机数值运算结果可知,方程组一般不存在合理全息记录参量解。实现上述三条准则的方程组如下

$$\begin{cases} \rho \cos^2 \alpha_1 + \rho' \cos^2 \beta_1 + (\lambda_1/\lambda_0) h_{200} = \cos \alpha_1 + \cos \beta_1 \\ \rho \cos^2 \alpha_2 + \rho' \cos^2 \beta_2 + (\lambda_2/\lambda_0) h_{200} = \cos \alpha_2 + \cos \beta_2 \\ \rho \cos \alpha_3 \sin \alpha_3 (\rho \cos \alpha_3 - 1) + \rho' \sin \beta_3 \cos \beta_3 (\rho' \cos \beta_3 - 1) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \rho_r (\cos \alpha_4 + \cos \beta_4) - (\lambda_4/\lambda_0) h_{020} = \rho + \rho' \\ \rho_r (\cos \alpha_5 + \cos \beta_5) - (\lambda_5/\lambda_0) h_{020} = \rho + \rho' \end{cases} \quad (7)$$

$$h_{300} = -(\lambda_0/\lambda_1) \cdot [\rho \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 (\rho \cos \alpha_1 - 1) + \rho' \sin \beta_1 \cos \beta_1 (\rho' \cos \beta_1 - 1)] \quad (8)$$

其中 α_i 、 β_i ($i=1 \dots 5$)是对应于 λ_i 的光线 λ 射角和衍射角, $\rho_r = R/\rho_D$, $\rho = R/r$, $\rho' = R/r'$, ρ_D 指环面弧矢半径。由(6)、(7)、(8)可决定结构参量 r 、 r' 、 ρ_D 以及全息象差系数 h_{200} 、 h_{020} 、 h_{300} ,由全息系数根据(5)式可以决定全息记录参量。

下面谈一下关于波长确定:

A. 离焦极小化波长 λ_1 、 λ_2 基本上取决定于单色器的光谱工作范围,使 m_{300} 极小化的波长 λ_3 是一个可调量。用多个 λ_3 值,由设计程序得到多组结构和记录参量值,通过光线追迹程序,得到每组参量值在整个波段内的标准方差分布。选取具有最小分布值所对应的那组参量值。

B. 选择合适(视工作波段范围及要求而定)的 $d\lambda$,可确定 $\lambda_4 = \lambda_1 + d\lambda$, $\lambda_5 = \lambda_2 - d\lambda$ 。

三、全息光栅设计程序

1. Seya—Namioka全息凹面光栅设计程序结构

我们应用了FORTRAN语言在IBM PC机上编制了Namioka凹面全息光栅设计和IV型环面全息光栅设计程序。前者由一个主程序DPHG·FOR和二个子程序COEFF·FOR和COPD·FOR组成。运行主程序占计算机容量48k。二个子程序功能:

- (1) COEFF·FOR计算全息象差系数。
- (2) COPD·FOR求解 ρ_D 的二次方程。

主程序DPHG·FOR的程序框图如图2。

2. IV型环面全息光栅设计程序结构

本文建立的IV型环面全息光栅设计程序由一个主程序DPHG·FOR和二个子程序COEFF4·FOR和COPD4·FOR组成,运行主程序占47k的容量。二个子程序的功能。

- 1). COEFF4·FOR: 计算有关结构和全息象差系数。
- 2). COPD4·FOR: 求解 ρ_D 的方程。

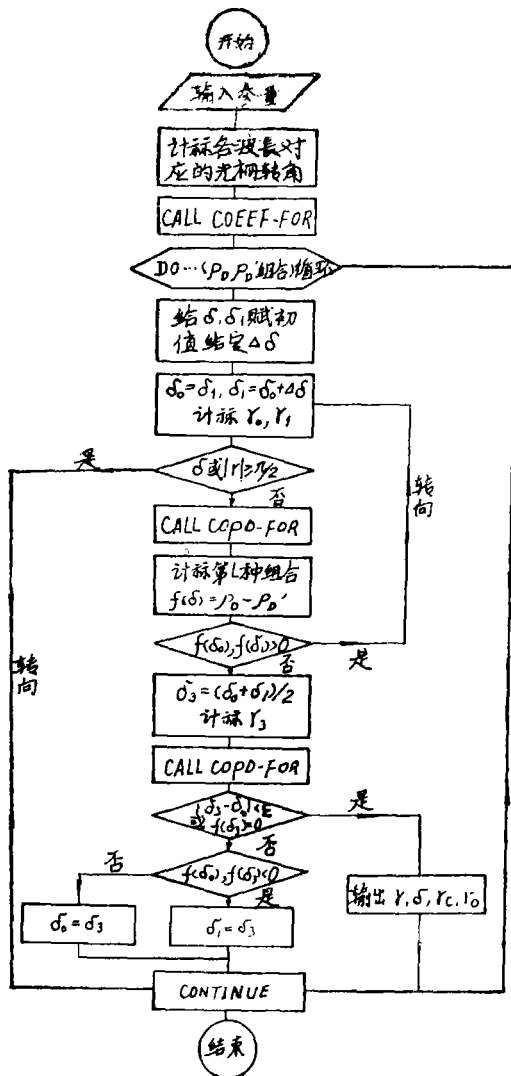


图 2

主程序 DPHG4·FOR 的程序框图结构和 COPD4·FOR 程序框图结构基本相同，下面仅作 COEFF4·FOR 的程序框图如图 3。

3. 全息光栅设计程序运行结果实例

(1) Namioka 凹面光栅设计

我们应用了设计程序得到几组全息参量解，输入的结构及有关参量如表 1，由运行设计程序得到全息记录参量解如表 2。我们还对由全息解得到的单色器作追迹计算。为了比较，另外还对具有相同结构参量的机刻光栅作追迹计算，取追迹波长 100nm。

表 1

R(mm)	r(mm)	r'(mm)	光线偏角	光线刻槽密度 (1/mm)	始端波长 (nm)	终端波长 (nm)	光谱级次	记录波长 (nm)
998.8	818.0	818.0	70.25°	600	0	700(2000)	+1	457.93

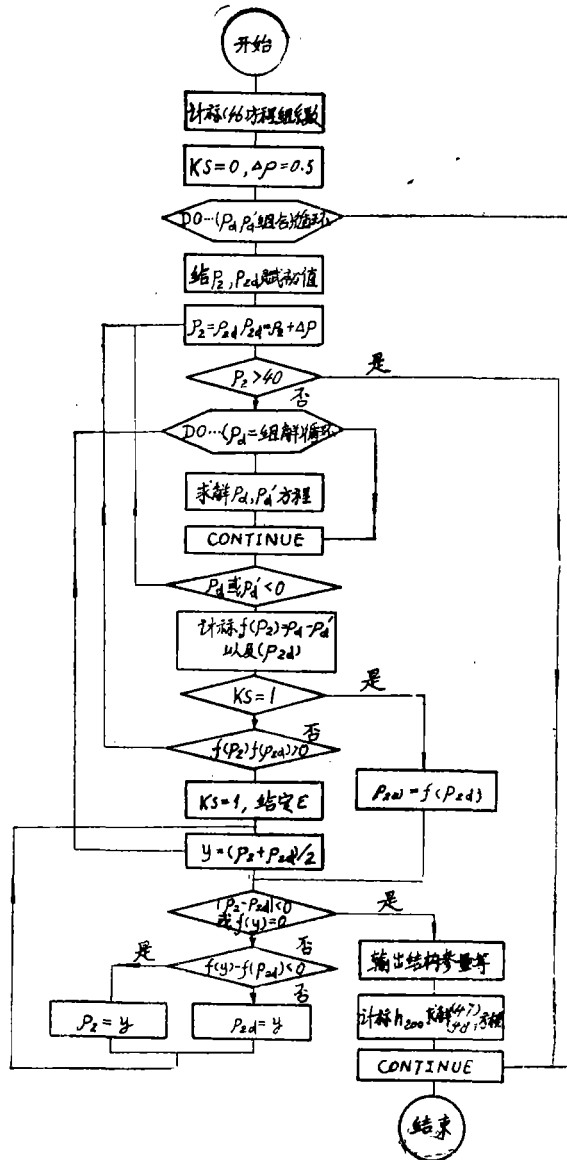


图 3

表 2

长度单位: mm

替差校正型	r_c	γ	r_D	δ	象散校正型	r_c	γ	r_D	δ
KT = 1	1112.672	-25.6764°	936.266	45.0726°	KT = 0	903.780	-35.6245°	615.604	59.0068°
(二组解)	1201.355	-38.8381°	1199.169	64.4063°					

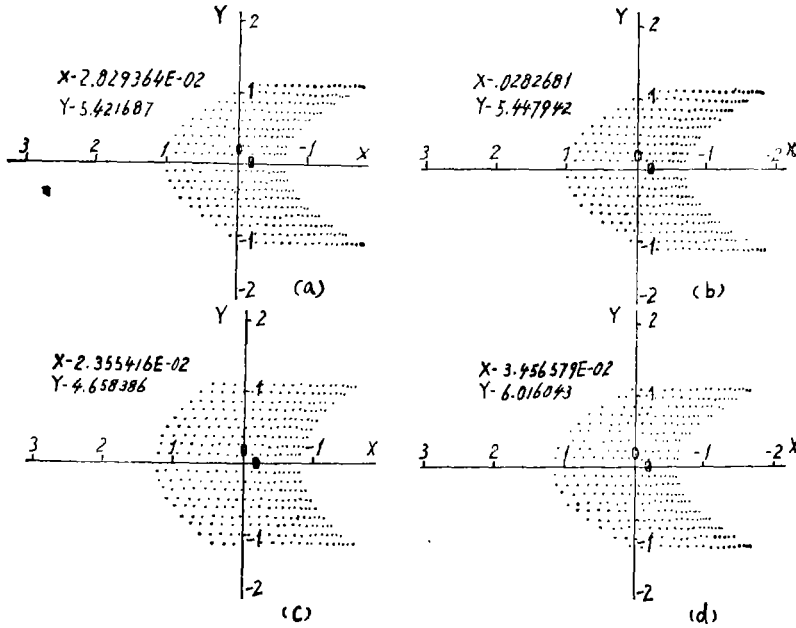


图4 (a)、(b)彗差校正型(二组解)(c)象散校正型(d)机刻光栅 $\lambda = 100\text{nm}$

由图4可知:(A)、彗差校正型的两组解的象质几乎一样。(B)、彗差校正型在子午方向象质优于象散校正型,而在弧矢方向却稍差于象散校正型。(C)、全息光栅的二种校正设计不论在子午、弧矢方向都优于机刻光栅。设计结果与预期一致。

(2) IV型环面全息光栅设计试例

程序有关输入参量如表3,由运行程序得到一系列结构和记录参量如表4,经追迹计算得到各组结构所对应的像点标准方差分布如表5,并得到追迹点列图如图5所示。在输入参量中, λ_3 是可调参量。本文在工作光谱波段内取四个 λ_3 值,每个 λ_3 值对应一组结果。点列图追迹波长 $\lambda = 8\text{nm}$ 。为了作比较,我们还追迹了其结构参量基本一致的机刻光栅,输入参量如表6,点列图如图6所示。

表 3

R(mm)	刻槽密度(1/mm)	光谱级次	记录波长(nm)	波长 λ_1 (nm)	波长 λ_2 (nm)	dλ(nm)	波长 λ_3 (nm)
9993.647	1200	+ 1	457.93	6	12	1	6.5, 7.5, 8.5, 9.5

表 4

长度单位(除波长):mm

波长 λ_3 (nm)	r	r'	ρ_0	r_c	γ	r_D	δ
6.5	1294.375	1777.917	234.487	4783.785	8.93901°	3532.461	23.21192°
7.5	1267.776	1830.623	234.484	2826.322	9.13137°	2336.240	23.00539°
8.5	1242.222	1886.609	234.481	2200.619	8.63017°	1893.466	23.54443°
9.5	1217.649	1946.203	234.478	1863.295	8.05768°	1639.867	24.16260°
6	1308.090	1752.70	234.488	19572.060	2.52511°	8444.741	30.36182°
5			无		解		

由表 6 可知, 当 λ_3 取 6nm 时, 全息记录矢径 r_0 太大, 不便研制。

表 5 标准方差值分布

单位: mm

波长 λ_3 (mm)		6.5	7.5	8.5	9.5
追迹波长 (nm)	5.5	0.31637	0.34216	0.36586	0.38913
	7.0	0.34351	0.36897	0.39279	0.41604
	8.5	0.37161	0.39732	0.42042	0.44270
	10.0	0.39784	0.42320	0.44588	0.46799
	11.5	0.42268	0.44876	0.47073	0.49247

表 6

物距 (mm)	像距 (mm)	子午半径 (mm)	弧矢半径 (mm)	光线偏角	波长	系统接收 (mrad)	刻槽密度 (1/mm)	光谱级次
1136	2000	9993.647	226.537	162°	8nm	2.5 (垂直), 25 (水平)	1200	+ 1

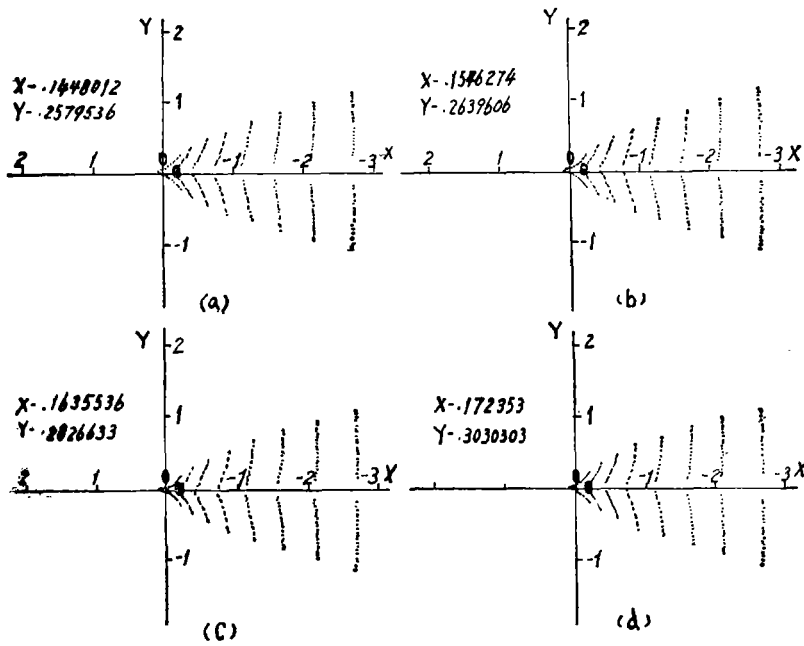


图 5 (a) $\lambda_3 = 6.5 \text{ nm}$ (b) $\lambda_3 = 7.5 \text{ nm}$ (c) $\lambda_3 = 8.5 \text{ nm}$ (d) $\lambda_3 = 9.5 \text{ nm}$
(轴上源点) $\lambda = 8 \text{ nm}$

由标准方差分布表 5 和图 5 点列图都一致表明, 选取较短波长 $\lambda_3 = 6.5 \text{ nm}$ 所得到的结果参量比较理想。我们将图 5 和图 6 比较可知, 由设计程序得到的 IV 型环面全息光栅设计, 在 8 nm 波长处, 其象质在子午 (色散方向) 方向优于结构参量基本一致的机刻环面光栅, 在弧矢方向稍差于机刻环面光栅, 这是由于机刻环面光栅消象散波长 (仅一个波长) 取在 9

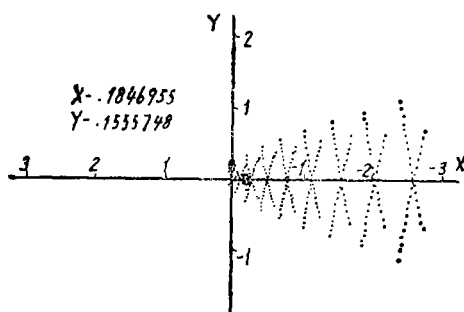


图6 单块环面光栅追迹点列图

nm, 其值很接近于 8 nm, 而环面全息光栅消象散波长(二个波长)选在工作波段两端。相信在 5 nm~13nm 波段内, 全息光栅综合象差将优于机刻光栅, 同时证明了设计程序确实有效。

参考文献

- [1] T.Namioka, H.Noda and M. Seya, Design of holographic concave gratings for Seya Namioka monochromators, J.Opt.Soc. Am., 1974, 64, 1031~1048.
- [2] R.L.Johuson, Holographic gratmgs, «Handbook on synchrotron radiation», Published by New Yovk, 1983.
- [3] A. Takahasi and T. Katayman, Automatic design of holographic gratings for Seya-Namioka monochromators(T), J.Opt.Soc Am., 1978. 68 1254~1256.
- [4] T. Namioka et al , Possibility of using the holographic coucave grathgs in vacuum monochromators, Sci. Light, 1973. 22, 77.
- [5] Lepere, D , Monochromator of toroidal holographic grathg, Nouv. Rev. Opt., 1975, 6, 173.
- [6] 庄夔, 消象差超环面全息光栅的设计和制作, «光学机械», 1985, 4 1~7.
- [7] J.Flamand, G.Passeran and A.Thevenon, Recent development in the field of far U. V.monochromators using toroidal holographic gratings, Nucl Instr and Meth., 1980, 172, 167~171.

Design of Concave Holographic and IV-type Toroidal Holographic Gratings

Lu Lijun

Abstract

According to Namioka's geometrical design theory of holographic concave gratings, we describe the design of concave holographic and IV-type aberration-reduced toroidal holographic gratings, and show the design programs in the paper. The raytracing calculation has shown that the programs can be used to design holographic grating monochromators having comparatively good image quality.