

文章编号: 1001-4322(2009)08-1129-05

环带阶梯形光栅限幅器的光场分布*

王 龙, 沈学举, 杨海林, 姜 楠, 陈 燕, 张 博, 严文科

(解放军军械工程学院 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘 要: 设计了一种环带阶梯形光栅限幅器,理论推导并数值模拟了光束通过该限幅器后在限幅光阑平面上的光场分布,定量分析了光强分布随光栅参数的变化规律。结果表明:环带阶梯型光栅实际上是一种闪耀光栅,选择合适的结构参量,可使能量集中分布在偏离光阑中心较远且宽度较大的圆形环带上;亮环位置由光栅递增厚度、光栅周期等参量确定;衍射最亮环位置随光栅递增厚度的增加周期性改变,当递增厚度满足一定条件时,最亮环位置与入射激光波长无关,这对设计多波段的光限幅器比较有利。

关键词: 光栅限幅器; 光强分布; 递增厚度; 光栅周期

中图分类号: O437 **文献标志码:** A

光限幅器设计是激光防护的核心研究内容之一。理想的光限幅器要求对低于限幅阈值的入射光,其出射光强和入射光强呈线性关系。对超过限幅阈值的入射光,出射光强为一常数。在光限幅器设计方面,1994 年美国报道了一种全波段的宽带热散焦液态光限幅器^[1],1995 年报道了一种被动式光栅防护装置^[1],它们均是基于光学非线性效应的。国内对光限幅器的研究主要集中在限幅材料^[2]和防护薄膜^[3]的基础研究上;实用化方面,河南大学的顾玉宗教授提出了一种基于反饱和吸收和非线性折射两种非线性光学效应的可见光波段光限幅器^[4];哈尔滨工业大学的李淳飞^[5]、中国科学院长春物理研究所的李燕^[6]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的关中素^[7]分别研究了不同结构的非线性光栅自调制光限幅器,都是基于直线型平面光栅设计的。鉴于激光防护系统中入射到限幅器的是近似球面波,为圆形光斑,为尽可能使衍射光呈圆对称分布以增强光限幅效果并减小其对光学系统的损伤,设计了一种环带阶梯型光栅限幅器。通过模拟球面波经该限幅器的传输特性发现,优化其结构参量可使限幅光阑上的光强集中在偏离光阑中心较远的宽衍射圆环上,满足一定条件时,衍射最亮环位置不随入射激光波长的变化而改变,这对设计多波段的激光防护器件有一定的参考意义。

1 理论模型

1.1 环带阶梯型光栅限幅器结构

环带阶梯型光栅限幅器是用环带阶梯型光栅与平板玻璃之间填充非线性溶液制作而成,其中所用光栅结构如图 1 所示,光栅由若干阶梯型环带构成,图 1 分别为俯视图和过中心的截面图。

工作装置如图 2 所示,透镜 L_1 和 L_2 构成望远系统,环带阶梯型光栅限幅器 S 和光阑 P 位于透镜 L_2 的前后焦面上。较低光强的入射光束经 L_1 汇聚后变成近似球

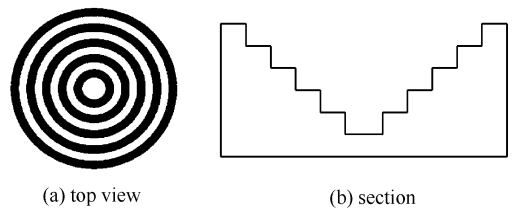


Fig. 1 Schematic diagram of step ring grating

图 1 环带阶梯型光栅示意图

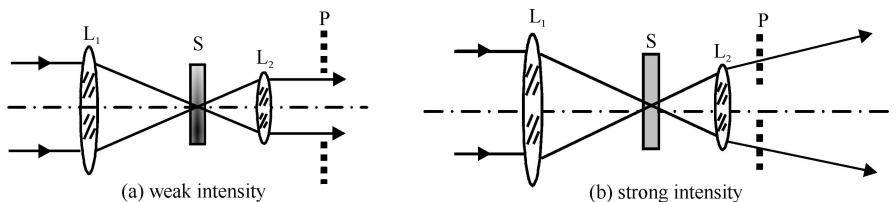


Fig. 2 Schematic diagram of limiting system with step ring grating optical limiter

图 2 环带阶梯型光栅限幅器工作装置示意图

* 收稿日期:2008-11-12; 修订日期:2009-05-18

作者简介:王 龙(1985—),男,汉族,山东蒙阴人,硕士研究生,从事光电对抗和激光防护技术的研究; wanglong4800533@163.com。

衍射,如图2(a)所示;强激光入射时,限幅器中溶液的折射率发生变化,显现出环带阶梯型光栅,发生衍射,衍射激光被光阑遮挡,实现激光防护,如图2(b)所示。

1.2 强激光通过环带阶梯型光栅限幅器的透射光场分布

当光栅周期和浮雕深度达到波长或亚波长量级时,基于标量衍射理论进行光学器件设计将缺乏可靠性^[8],故分析光栅周期和浮雕深度在 μm 量级以上的情况。

设光栅内环半径为 r_1 ,环带宽度为 d ,环带递增厚度为 h ,透镜 L_2 的焦距为 f , ρ 和 r 分别为 L_2 前后焦面的极坐标, z 表示限幅器偏离 L_1 后焦面的距离。战场上入射激光束经过数 km 的传输后光束截面扩大很多,远大于接收光学系统的口径,因此照射到 L_1 不同位置的激光的强度和相位都比较均匀,故经 L_1 汇聚后的激光可近似为球面波,限幅器入射表面的光场复振幅可表示为

$$E(\rho) = \frac{A}{\sqrt{z^2 + \rho^2}} \exp(-ik\sqrt{z^2 + \rho^2}) \quad (1)$$

式中: k 为波数。由于 L_1 后焦面上入射激光被汇聚成一个艾里斑,因此只考虑离焦($z \neq 0$)情况,若焦距为 f_1 的汇聚透镜 L_1 的直径为 D ,由几何知识可求得限幅器前表面光斑覆盖的光栅环带数 $N = (zf_1^{-1}D - 2r_1)/2d$ 。若非线性光学效应使溶液折射率减小 Δn ,可把限幅器的透射系数表示为

$$t(\rho) = \text{circ}(\rho/r_1) + \sum_{m=1}^{N-1} [\text{circ}(\rho/r_{m+1}) - \text{circ}(\rho/r_m)] \exp(ik\Delta n mh) \quad (2)$$

实际应用中 $z \gg d$,近似用环带中间位置的相位表示宽度为 d 的环带上任意位置的相位,且式(1)中振幅可近似为常数,取为 1,联立式(1),(2)得限幅器出射面的复振幅为

$$E'(\rho) = \text{circ}(\rho/r_1) \exp[-ik\sqrt{z^2 + (r_1/2)^2}] + \sum_{m=1}^{N-1} [\text{circ}(\rho/r_{m+1}) - \text{circ}(\rho/r_m)] \exp(ik\Delta n mh) \exp[-ik\sqrt{z^2 + (r_1/2 + md)^2}] \quad (3)$$

限幅器和光阑分别位于 L_2 的前后焦面时,光阑面上的复振幅为^[9]

$$E(r) = \frac{1}{i\lambda f} F[E'(\rho)] \quad (4)$$

其中:F 表示傅里叶变换,即

$$E(r) = \frac{1}{\lambda f} \sum_{m=0}^{N-1} (r_1 + md) \frac{J_1[2\pi(r_1 + md)f_r]}{f_r} \exp\left[\frac{i\pi}{2} + ik\Delta n mh - ik\sqrt{z^2 + (r_1/2 + md)^2}\right] - \frac{1}{\lambda f} \sum_{m=0}^{N-2} \frac{(r_1 + md) J_1[2\pi(r_1 + md)f_r]}{f_r} \exp\left\{\frac{i\pi}{2} + ik\Delta n(m+1)h - ik\sqrt{z^2 + [r_1/2 + (m+1)d]^2}\right\} \quad (5)$$

式中: $f_r = r/\lambda f$ 。当 $r_1 + (N-1)d \ll z$ 时,入射到限幅器表面的光波可以近似为平面波,只考虑相对相位(公共相位的相位因子不改变光阑面上的光强分布)时,可把光场复振幅表示为

$$E'(r) = \frac{1}{\lambda f} \sum_{m=0}^{N-1} (r_1 + md) \frac{J_1[2\pi(r_1 + md)f_r]}{f_r} \exp\left(\frac{i\pi}{2} + ik\Delta n mh\right) - \frac{1}{\lambda f} \sum_{m=0}^{N-2} \frac{(r_1 + md) J_1[2\pi(r_1 + md)f_r]}{f_r} \exp\left[\frac{i\pi}{2} + ik\Delta n(m+1)h\right] \quad (6)$$

另有光强分布公式

$$I(r) = E(r)E(r)^* \quad (7)$$

为便于理解光阑面上的光强分布特性,先求 1 维情况下的光强分布。由图 1(b)得限幅器透射系数为

$$t_1(\rho) = \text{rect}\left(\frac{\rho}{d}\right) + \sum_{m=1}^{N-1} \left[\text{rect}\left(\frac{\rho - md}{d}\right) + \text{rect}\left(\frac{\rho + md}{d}\right) \right] \exp(ik\Delta n mh) \quad (8)$$

用傅里叶变换的方法,可求得平行光入射限幅器情况下光阑面上的 1 维光强分布为

$$I_1(r) = I_0 \frac{\sin^2(\pi d f_r)}{(\pi d f_r)^2} \left\{ A^2 + B^2 + 2AB \cos\left[\frac{\delta_1}{2} + \frac{(2N-1)\delta_2}{2}\right] \right\} \quad (9)$$

其中: $r_1 = d$, $\delta_1 = k\Delta n h$, $\delta_2 = \frac{2\pi d r}{\lambda f}$, $A = \frac{\sin[N(\delta_1 - \delta_2)/2]}{\sin[(\delta_1 - \delta_2)/2]}$, $B = \frac{\sin[(N-1)(\delta_1 + \delta_2)/2]}{\sin[(\delta_1 + \delta_2)/2]}$ 。由式(5)和式(7)

可数值计算限幅光阑平面上的光强分布,式(9)用来解释光阑面上光强分布的部分规律。可以看出,环带阶梯

型光栅实际上是一种 2 维闪耀光栅，只有单环带衍射零级极大范围内的一个或两个环形干涉条纹才有较大的光强度。

2 数值模拟及结果分析

计算中取 L_2 的焦距 $f=200$ mm，激光波长 $\lambda=532$ nm，强激光致溶液折射率变化 $\Delta n=0.1$ 。

取 $D=20$ mm, $z=10$ mm, $r_1=d=1$ μm , $h=2$ μm , 分别由式(5)和(7)以及式(6)和(7)计算所得 $f_1=200$ mm 时限幅光阑平面上的光强分布如图 3 所示。

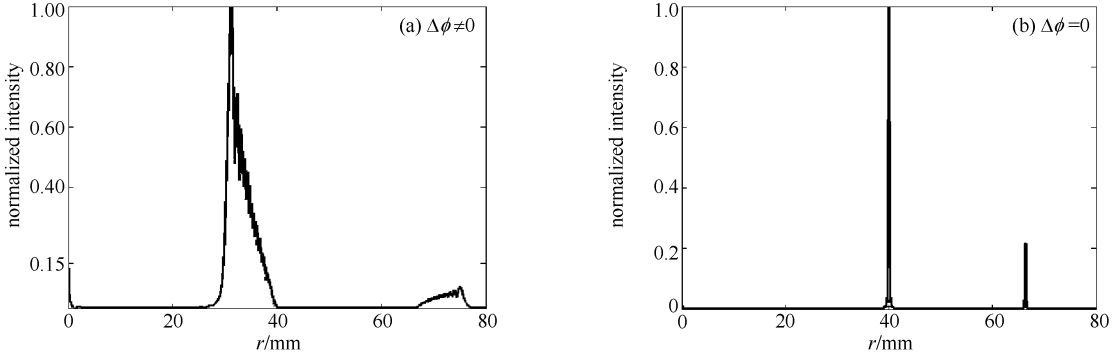


Fig. 3 Intensity distribution on the plane of aperture

图 3 限幅光阑上的光强分布曲线

从图 3(a)看出，由于强激光致非线性溶液折射率变化使限幅器呈现光栅结构，衍射的结果使能量主要集中在内外半径分别为 30 和 40 mm 以及 70 和 78 mm 的两个环带上，这与根据公式(9)分析得到的结论一致，亮环位置分别与 $\delta_2 = \delta_1$ 和 $\delta_2 = 2\pi - \delta_1$ 对应；但光阑中心光强不为零，强度约为最亮环峰值强度的 15%。由于入射到限幅器的是球面波，光栅第 l 和 $l-1$ 两相邻周期透射的干涉光束存在相位差 $\Delta\phi = k(2l-1)d^2/z$ ，其值随 l 改变； $\Delta\phi=0$ 表示平面波入射限幅器，此时光强分布如图 3(b)所示，可以看出，球面波引入的相位差使亮条纹变宽，而且使光阑中心处光强不为零。

取 $h=2$ μm ，由式(5)和(7)计算所得光阑面上的光强随 r_1 和 d 的变化曲线如图 4 所示。比较图 4(a)和图 4(b)看出， r_1 增大并不引起亮环半径和宽度的明显变化，这是因为亮环的形成主要取决于光束之间的干涉作用，受最内环影响不大。比较图 4(a)和图 4(c)看出， d 的增大使两个衍射亮环的半径同时减小，光阑中心处光强变大。根据亮环条件 $\delta_2 = \delta_1$ 和 $\delta_2 = 2\pi - \delta_1$ 解得 $r_1 = \Delta n h f / d$, $r_2 = (\lambda - \Delta n h) f / d$ ，可以看出：亮环半径与光栅环带宽度成反比， d 的增大使亮环半径减小相同的倍数；同时，环带宽度的增加导致衍射效果减弱，从而光阑中心光强变大。

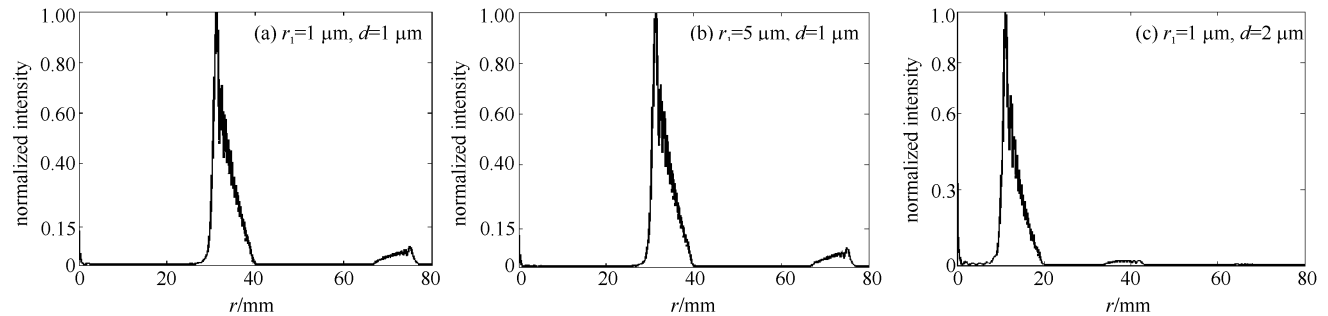


Fig. 4 Intensity distribution with different interior ring radii and step ring widths

图 4 光强分布随内环半径和环带宽度的变化规律

取 $r_1=d=1$ μm ，由式(5)和(7)计算所得光强分布随递增厚度的变化曲线如图 5 所示。比较图 5 看出， $h < 2.8$ μm 时，随 h 的增加最亮环半径增大，次亮环半径减小且强度增大， $h=2.8$ μm 时二者相遇在一起； 2.8 $\mu\text{m} \leq h \leq 5.32$ μm 时，随 h 的增加，最亮环半径减小，次亮环半径变大强度减小， $h=5.32$ μm 时，最亮环移到光阑中心位置，光阑中心位置光强最大，在其附近出现一个半径为 10 mm 的亮斑。由亮环半径 $r_1 = \Delta n h f / d$, $r_2 = (\lambda - \Delta n h) f / d$ 看出， r_1 和 r_2 随 h 的变大分别增大和减小；但单环带的衍射效应使半径小的亮环强度大，为最亮环； $h = \lambda / 2\Delta n$ 时， $r_1 = r_2$ 两亮环重合，此时最亮环半径最大； $h = \lambda / \Delta n$ 时， $r_2 = 0$ 最亮环位于光阑中心位置；

当 $h \neq \lambda/\Delta n$ 时, 递增厚度的改变对光阑中心处光强影响不大, 这是环带阶梯型光栅的闪耀光栅特性导致的, 光强主要集中在两个亮环上, 其它位置几乎为零, 光阑中心处的光强是因为入射球面波引入的位相差产生的, 与光栅的衍射能力无关。

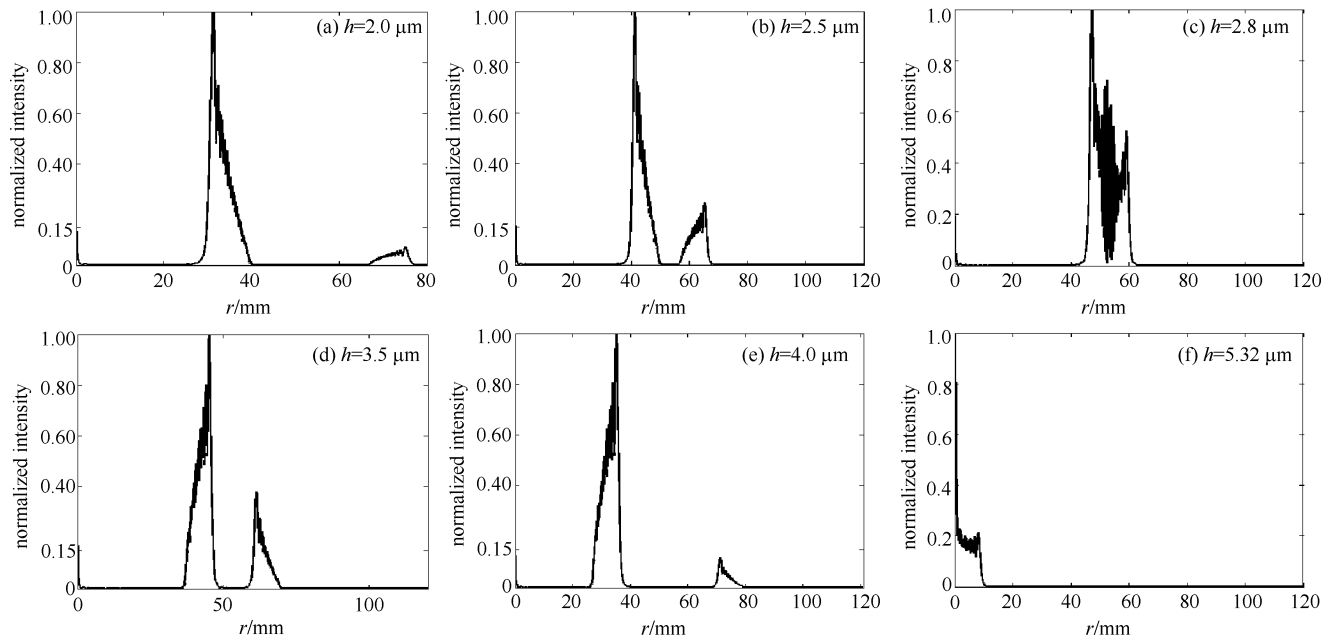


Fig. 5 Intensity distribution with different depth steps

图5 不同递增厚度下的光强分布曲线

取 $r_1 = d = 1 \mu\text{m}$, $h = 2.5 \mu\text{m}$, 由式(5)和(7)计算得波长为 532, 700, 1 064 nm 的激光通过限幅器时光阑平面上的光强分布如图 6 所示。可以看出, 次亮环半径随波长的增加而变大且强度减弱, 但是最亮环的位置和宽度基本不变。这是因为, 亮环半径分别由 $r_2 = (\lambda - \Delta n h) f / d$ 和 $r_1 = \Delta n h f / d$ 决定, 且此时 $r_1 < r_2$, 故最亮环半径与入射激光波长无关, 这对限幅光阑的设计非常有利。进一步分析发现, 限幅器结构参量满足 $h \leq \lambda_{\min} / 2\Delta n$ 时(其中 λ_{\min} 为需要防护的激光中的最小波长), 环带阶梯型光栅限幅器可对多个波长激光同时进行有效防护。

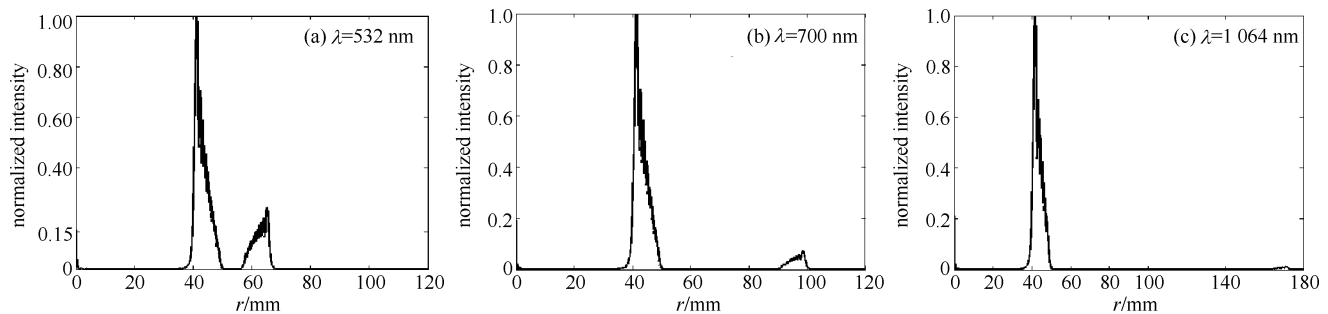


Fig. 6 Intensity distribution for different incident wavelengths

图6 不同波长入射时的光强分布曲线

3 结论

设计了一种新型光限幅器, 推导了强激光入射时光阑面上的光强分布表达式, 定量分析了强度分布随光限幅器结构参量的变化规律。结果表明: 选择合适的光限幅器结构参量可使光阑面上的光强集中在偏离光阑中心的衍射亮环上, 其位置由光栅周期和递增厚度等参量决定; 递增厚度小于或等于 $\lambda_{\min} / 2\Delta n$ 时, 衍射最亮环的位置与入射激光波长无关。具体设计中可以先递增厚度等于 $\lambda_{\min} / 2\Delta n$ 确定出光栅的递增厚度, 然后确定周期常数和最内环半径, 在满足标量波使用条件的范围内二者越小效果越好。

参考文献:

- [1] 顾玉宗, 于富熹. 被动光学限幅器的机制与研究进展[J]. 物理, 2002, 31(1): 17-21. (Gu Yuzong, Gan Fuxi. Mechanisms and advances of pas-

sive optical limiters. *Physics*, 2002, **31**(1):17-21)

- [2] 肖万能, 李润华, 曾学然, 等. 新型 Ru 配合物三阶非线性光学性质的 Z-扫描研究[J]. 物理学报, 2000, **49**(6):1086-1090. (Xiao Wanneng, Li Runhua, Zeng Xueran, et al. A study on the third-order nonlinearities of new ruthenium complexes by Z-scan technique. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(6):1086-1090)
- [3] 骆永全, 王伟平, 罗飞. V_2O_5 薄膜在连续激光防护中的应用研究[J]. 应用激光, 2005, **25**(6):23-25. (Luo Yongquan, Wang Weiping, Luo Fei. Study on the application of vanadium pentoxide thin films in continuous laser protection. *Applied Laser*, 2005, **25**(6):23-25)
- [4] 顾玉宗, 梁志坚, 干福熹. 一种可见光波段光学限幅器的研究[J]. 中国激光, 2002, **29**(1):33-36. (Gu Yuzong, Liang Zhijian, Gan Fuxi. An optical limiter for visible light of lasers. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(1):33-36)
- [5] 李淳飞, 王瑞波, 方光宇, 等. 双光栅夹有机溶液构成的宽带光限幅器[J]. 光学学报, 1999, **19**(3):119-125. (Li Chunfei, Wang Ruibo, Fang Guangyu, et al. Broadband optical limiter with an organic solution sandwiched between two gratings. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(3):119-125)
- [6] 李燕, 徐迈, 李也凡. 非线性光栅的自适应光限幅[J]. 发光学报, 2000, **21**(3):91-93. (Li Yan, Xu Mai, Li Yefan. Adaptive optical limiting of nonlinear grating. *Chinese Journal of Luminescence*, 2000, **21**(3):91-93)
- [7] 关中素, 掌蕴东, 马少杰, 等. 非线性光栅自调制光限幅器件研究[J]. 液晶与显示, 2005, **20**(2):27-30. (Guan Zhongsu, Zhang Yundong, Ma Shaojie, et al. Optical limiter research by self-modulating of nonlinear grating. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, **20**(2):27-30)
- [8] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. (Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian, et al. Binary optics. Beijing: National Defense Industry Press, 1998)
- [9] 梁铨廷. 物理光学[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 1987. (Liang Quanting. Physical optics. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 1987)

Intensity distribution of optical limiter based on step ring grating

Wang Long, Shen Xueju, Yang Hailin, Jiang Nan, Chen Yan, Zhang Bo, Yan Wenke

(Department of Optical and Electric Engineering, The PLA College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: An optical limiter has been designed based on the step ring grating. The intensity distribution of a beam transmitting through the limiter was derived theoretically and simulated, and the changes rules of intensity distribution with grating indexes were analyzed in numerical methods. The simulation results show that this grating is a kind of blazed grating, and the incident energy would mainly distribute on one or two wide light rings apart from the aperture center for the limiter with suitable indexes. The light ring position is determined by grating depth step and period. It changes in period when the depth step increases, and the lightest ring position is independent of incident wavelengths if suitable indexes are selected, which is useful for designing effective multiband limiters.

Key words: optical limiter based on grating; intensity distribution; depth step; grating period