

文章编号: 0253-2239(2007)08-1377-5

二维机械准直器准直光束的衍射

贾 辉 姚 勇 施伟杰

(哈尔滨工业大学深圳研究生院 激光信息技术研究中心, 深圳 518055)

摘要: 把入射光作为从不同方向入射的空间光,应用傅里叶光学的方法分析了通过机械准直器中一组不同间距的栅格挡光片的物理过程。建立了准直光束的理论计算公式,给出了采用数值方法精确计算准直光束的主要步骤和计算中应注意的问题,计算了空间频率分布。对于从各方向入射的光辐射,证明了机械准直器的准直性能,对于平行光入射,计算了通过机械准直器的光辐射衍射,衍射超出了准直器的几何阴影区,得到了准直光束空间频率的二维分布图形。与国外一维的方法相比,该方法更准确、快捷,计算结果与实验数据比较,更接近实验结果。

关键词: 信息光学; 准直光束; 空间频率; 傅里叶变换; 机械准直器

中图分类号: O438.2 文献标识码: A

Diffraction of Collimated Beam through Two-Dimensional Mechanical Collimator

Jia Hui Yao Yong Shi Weijie

(Research Center of Laser Information Technology, Shenzhen Graduate School,
Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055)

Abstract: Assuming that the incident light is from different directions, the process of the incident light passing a series of grids with different intervals has been described and analyzed by applying two-dimensional Fourier optical method. A formula for the distribution of the collimated beam's spatial frequency is established and the spatial frequency distribution of the incident light is obtained. The main procedures and key points in the calculation are listed. When the incident light is from every direction, the calculation demonstrates the collimation performance, when the incident radiation strikes on the collimator parallel, the calculated result shows the diffraction of the collimated beam. The diffraction reaches out of the geometrical shade. The two-dimensional distribution of the collimated beam's spatial frequencies is obtained. The data agree better with the published experimental result than the one-dimensional calculation of foreign peers. This method is a quick and accurate way to calculate the performance of the collimator.

Key words: information optics; collimated beam; spatial frequency; Fourier transform; mechanic collimator

1 引 言

在紫外辐射的探测中,由于光学元件在紫外波段不能透过真空紫外光或者对紫外光的反射率很低,因此研制这一谱段的光谱仪有很大的困难,为了能够探测到紫外光谱,在设计仪器时,要尽量减少光学反射面,提高光学元件的反射率。但是对于探测微弱的紫外光辐射,还是很难实现。为此研究人员想出各种方法来改善紫外光谱仪器,采用了一种新的准直器件——机械准直器^[1,2],它没有反射面,光辐射透射率高,预计理论上可以达到 50%,它还可以应用到 X 射线波段作为准直器,并应用到可见光和红外波段作为

滤波器^[3]。机械准直器的另一个特点是它的高精度,它可以准直到 0.3 mrad。机械准直器作为高透射率、高精度的光学准直器件,已经应用到许多领域,特别是航空、航天领域。美国海军实验室为防御气象卫星计划而研制的探测大气紫外辐射的紫外临边成像光谱仪(SSULD)^[4,5],就采用了机械准直器作为该仪器视场的光学准直器件;它还被用于太空探测,作为观测太阳大气的空间太阳望远镜的光学准直器件;在医学上,它可以用于 γ 射线的准直等等。

机械准直器出射光束的衍射对它的准直性能有很大的影响,会降低它的准直精度,因此在研制机械

作者简介: 贾 辉(1970—),男,吉林长春人,博士,主要从事成像光谱仪和微型光谱仪方面的研究。

E-mail: jiahuijiah@yahoo.com

收稿日期: 2006-10-17; 收到修改稿日期: 2007-02-19

准直器^[6~11]的过程中,都要考虑光束的衍射。Charles A. Lindsey^[12]应用菲涅耳衍射公式分析了二维机械准直器的衍射,他认为二维机械准直器的衍射问题,可以分解为两个一维机械准直器的衍射问题,采用一维方法分析了有限栅格挡光片和无限周期栅格挡光片的情况,得到在狭缝间距约 100 μm 时,0.1 nm 的 X 射线是透明的,而大于 1 nm 的 X 射线衍射将占主导地位,使响应角度增宽 1 倍以上。R. L. Blake 等^[13]实验研究了机械准直器的衍射,并讨论了狭缝的宽度和数目对机械准直器透射率的影响,以及制作机械准直器的材料选择。Robert L. Lucke 等^[14]从傅里叶光学的角度分析了光辐射在机械准直器中的传输,把二维的机械准直器分解成两个一维的机械准直器来分析,并采用了两个无量纲参量描述机械准直器,通过分析计算了机械准直器的准直光束的角度响应随波长的变化——也即衍射效应和透射率,讨论了机械准直器设计参量的选择和优化。

在应用傅里叶光学方法分析一维的机械准直器过程中,Robert L. Lucke 等为了计算方便对公式做了简化,为了完全、直接描述机械准直器的二维准直光束,分析讨论机械准直器的性能,本文采用二维傅里叶光学方法,通过数值计算的方法来分析光辐射在机械准直器中的传输,计算了准直光束空间频率的分布——亦即准直光束的衍射。

2 二维傅里叶光学方法

机械准直器是由多片很薄的不锈钢网格状金属片组成的,网格由横条分开,网格的大小由准直器的视场决定。图 1 为一个金属片,左侧是它的局部放大图形,整个金属片的工作部分由许多个支撑横条

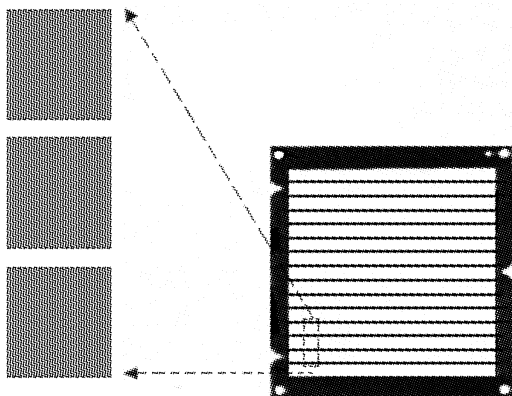


图 1 机械准直器的金属挡光片结构

Fig. 1 Pattern of the metal grid of the mechanical collimator

分隔开,间隔部分是匀排的许多个竖格。各金属片之间的距离按一定的规律排列。

下面应用二维傅里叶光学方法来分析光辐射在机械准直器中的传输。如图 2 所示,在传输过程中,有两个主要的环节,透过金属挡光片和两片金属挡光片之间的传输。

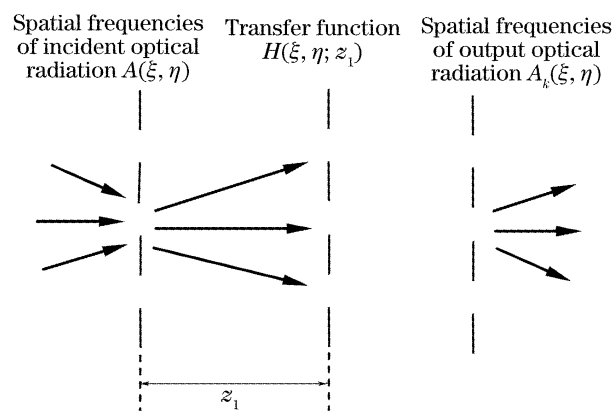


图 2 光辐射在机械准直器中的传输

Fig. 2 Optical radiation transferring through the mechanical collimator

光辐射透过挡光片,应该用光辐射的振幅函数乘以挡光片的透射率函数,而光辐射在两片挡光片之间传输时是光辐射的空间频谱函数乘以传输函数。因此,计算光辐射在机械准直器中的传输时还要在频率域和空间域不断的变换,也就是不断的傅里叶变换和反变换。首先假定含有不同空间频率组分的光辐射在频率域的函数为 $A(\xi, \eta)$, 在入射到第一片栅格挡光片时,应进行傅里叶逆变换,变换为空间域的振幅函数 $U_0(x, y)$,

$$U_0(x, y) = \iint_{\Sigma} A(\xi, \eta) \exp[j2\pi(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta, \quad (1)$$

其中, Σ 是空间频率积分区间。栅格挡光片的透射率函数为 $G(x, y)$, 如果栅格的透光部分用 1 表示,不透光的部分用 0 表示,透射率函数可以表示为

$$G(x, y) = \sum_{r=1}^R \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} \text{rect}\left[\frac{x - (r-1)d}{s}\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{y - (\gamma-1)u}{t}\right], \quad (2)$$

其中 R 为狭缝的行数, Γ 为狭缝的列数, $\text{rect}()$ 表示矩形函数。按照傅里叶光学的理论,在光辐射传输到第二片栅格挡光片的过程中,光辐射的空间频率函数应乘以传输函数 $H(\xi, \eta; z)$,

$$H(\xi, \eta; z) = \begin{cases} \exp[jkz \sqrt{1 - (\lambda\xi)^2 - (\lambda\eta)^2}], & \xi^2 + \eta^2 \leq 1/\lambda^2 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (3)$$

因此,在乘以传输函数 $H(\xi, \eta; z)$ 之前,应先进行傅里叶变换,把函数从空间域变换到频率域。在透过第二片挡光片之前,再把函数从频率域变换到空间域。透过第二片挡光片的过程和透过第一片的情况相

同,只是第二片和第三片挡光片的间距不同。如此反复,直到光辐射透过最后一块挡光片。光辐射的空间频率函数为

$$A_K(\xi, \eta; z_K) = \mathcal{F}\{G_K(x, y)\mathcal{F}^{-1}\{H_K(\xi, \eta; z_K)\cdots\mathcal{F}^{-1}\{H_1(\xi, \eta; z_1)\mathcal{F}\{G_1(x, y)\mathcal{F}^{-1}\{A(\xi, \eta)\}\}\}\cdots\}, \quad (4)$$

其中, $G_K(x, y)$ 是第 K 个金属片的透射率函数, \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别代表傅里叶变换和傅里叶逆变换, z_K 表示第 $K-1$ 个金属片和第 k 个金属片之间的距离。最后,在距离机械准直器 l 处光辐射的空间频率分布和振幅分布为

$$A_l(\xi, \eta; l) = A_K(\xi, \eta; z_K) \exp[jKl \sqrt{1 - (\lambda\xi)^2 - (\lambda\eta)^2}], \quad (5)$$

$$U_l(x, y; l) = \mathcal{F}^{-1}\{A_l(\xi, \eta; l)\}. \quad (6)$$

直接应用二维的分析方法有一些困难,主要是计算上的问题,如果通过直接化简求出光辐射的空间频率函数的数学公式,是不可能的,因为两个自变量参量是不能分开的。如果应用数值计算的方法,可以通过数学计算软件实现。在计算中,有一个需要特别注意的问题,那就是表示光波的矩阵从空间域变换到频率域,接下来还要进行乘运算,这就需要使矩阵相互对应,即变换后的矩阵和相乘矩阵的同一位置元素应该对应同一自变量值——同一空间频率。反之,光波函数从频率域变换到空间域后,与相乘的空间域函数的同一位置元素应该对应同一自变量值——同一空间坐标。根据数字信号处理理论,这一问题属于周期信号分立谱的傅里叶变换问题,其变量之间的关系是 $\Delta f = 1/T$, $N = f_s/\Delta f$, $\Delta x = 1/f_s$, 这里 Δf 是空间频率间隔, T 是金属片的空间长度, N 是采样频率, f_s 是空间频率的带宽, Δx 是空间采样间隔。在这个问题里,空间频率的最大变化范围是 $[-1/\lambda, 1/\lambda]$, 为了能够对近轴光的空间频率进行细致分析,取入射角的变化范围在 ξ 轴上从 $90-\alpha$ 到 $90+\alpha$, 在 η 轴上从 $90-\beta$ 到 $90+\beta$, α, β 是入射光的方向余弦。则空间频率的变化范围是:

在 ξ 轴上

$$\{\cos[(90-\alpha)/180 \times 3.1415926]/\lambda, \cos[(90+\alpha)/180 \times 3.1415926]/\lambda\},$$

在 η 轴上

$$\{\cos[(90-\beta)/180 \times 3.1415926]/\lambda, \cos[(90+\beta)/180 \times 3.1415926]/\lambda\}.$$

在实际计算过程中,对应不同的情况,假定入射光含有不同的空间频率组分,即给定不同的空间频率矩阵,通过上边的公式计算光辐射最后通过机械

准直器的矩阵,从而对机械准直器的性能进行分析。主要的计算流程如以下步骤:

1) 给定机械准直器的基本原始参量, x 方向的狭缝宽 s 、周期 d , y 方向的狭缝宽 m 、周期 n , 机械准直器的长度 L , 金属片的个数 K , 所求机械准直器的光场位置 l 。

2) 根据具体问题,选定入射角的大小,进而确定在频率域中,频率的变化范围 f_s 。参照采样定理,并结合具体问题要求的精度选定采样频率 N 。根据数字信号处理的傅里叶变换中参量关系, $\Delta f = 1/T$, $N = f_s/\Delta f$, $\Delta x = 1/f_s$, 求出函数在傅里叶变换和逆变换中对应的空间域和频率域的所有二维上的参量。

3) 根据入射光的特点以及在计算中的精度要求,给定入射光频率矩阵 A_{nm} , 由 $G(x, y)$ 解析式求得 $G(x, y)$ 在空间域内的矩阵 G_{nm} 。

4) 令 $n=1$, 求矩阵 A_{nm} 的傅里叶逆变换, 再点乘金属片的透射率函数矩阵 G_{nm} , 并进行傅里叶变换得到 $B_{nm} = \mathcal{F}\{\mathcal{F}^{-1}(A_{nm}) \cdot G_{nm}\}$ 。

5) 计算第 K 和 $K+1$ 片金属片之间的距离 $z_K = z(n)$, 根据传递函数 $H(\xi, \eta; z)$ 的解析式, 求得其频率域的矩阵 H_{nm}^K , H_{nm}^K 点乘矩阵 B_{nm} 。

$$6) \text{ 令 } B_{nm} = \mathcal{F}\{\mathcal{F}^{-1}\{H_{nm}^K \cdot B_{nm}\} \cdot G_{nm}\}.$$

7) $n=n+1$, 如果 $n \leq K-1$, 返回步骤 5)。如果 $n > K-1$, 进行下一步。

8) 计算 $z=l$ 时传递函数 $H(\xi, \eta; z)$ 的矩阵 H_{nm}^l , 则 $H_{nm}^l \cdot B_{nm}$ 即为机械准直器出射光场 l 处的空间频率矩阵。

9) 根据 l 处的空间频率矩阵, 求解其它函数和物理量。

3 计算结果

机械准直器的准直性能在几何光学的理论中已经得到证实。但是从傅里叶光学的角度来说,由于存在衍射的情况,它的准直效果未必如几何光学所描述的那样。在这里,为了验证二维傅里叶光学方法和机械准直器的性能。以美国卫星上搭载的机械准直器(SSULI)^[15]为例。它的基本参量是: $s=0.1524\text{ mm}$, $d=0.2286\text{ mm}$, $t=4.2926\text{ mm}$, $u=5.2578\text{ mm}$,总长 $L=101.6\text{ mm}$,15行341列狭缝,共22片挡光片。其中 s 和 t 为狭缝在两个方向上的宽度, d 和 u 为狭缝在两个方向上的周期长度。取入射光的空间频率变化范围为最大范围 $[-1/\lambda, 1/\lambda]$,为了能够得到计算结果,降低采样率以使矩阵不是很大。假定入射光从各个方向入射,而且振幅都相同。图3是光辐射通过机械准直器后空间频率的二维分布。从图中可以看出,近轴的小角度范围内的光辐射通过了机械准直器,频率曲线呈对称分布;在交叉的频率轴上其它位置有十分微弱的光辐射频率分布,在远离光轴的位置几乎没有光辐射。

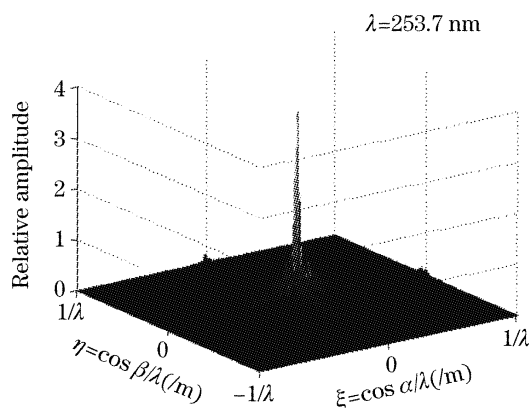


图3 含有全部空频率的光辐射通过机械准直器后的空间频谱分布

Fig. 3 Distribution of spatial frequency after the incident light containing all spatial frequencies passes the mechanical collimator

下面分析光辐射通过机械准直器的衍射。取平行光轴的入射光辐射,计算通过机械准直器的空间频率分布,为获得衍射的细节情况,取入射光辐射的入射角在 $[-0.1^\circ, 0.1^\circ]$ 和 $[-2.4^\circ, 2.4^\circ]$ 之间,即空间频率变化范围 $[-\cos 0.1^\circ/\lambda, \cos 0.1^\circ/\lambda]$ 和 $[-\cos 2.4^\circ/\lambda, \cos 2.4^\circ/\lambda]$,图4为准直光束的空间频率分布,在空间频率平面上,有三簇空间谱,以空间频率轴 η 对称分布,峰值在中央。在空间频率轴 ξ 上,频谱排列很近,范围很小,对应角度约 0.03° ;在空间频率轴 η 上,间距较大,两侧的两簇峰值相距中

间峰值约 1.6° 。如果在空间频率轴 η 上取更大的空间频谱范围,在距离零频率的两侧更远的位置还会有更微弱的空间频谱分布。该计算结果与R. L. Blake等^[13]的实验中拍照的二维频谱分布情况符合得很好。

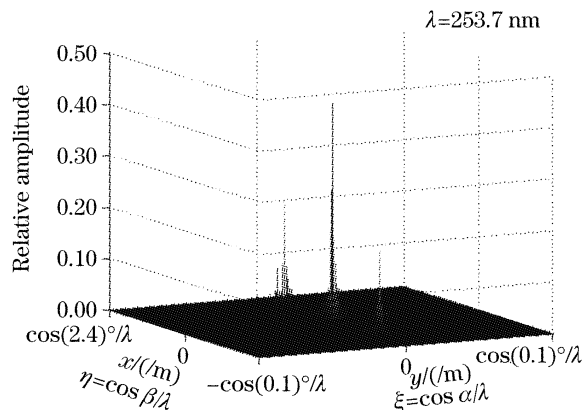


图4 平行于光轴的光辐射通过机械准直器后的空间频谱分布

Fig. 4 Distribution of spatial frequency after the the incident light parallel with the collimator's axis passes the mechanical collimator

4 结 论

应用傅里叶光学的方法建立了二维机械准直器出射光场的计算公式,通过计算验证了机械准直器的准直功能,分析了平行入射光束通过机械准直器的衍射,和文献[13]中的实验结果完全一致。二维傅里叶光学方法可以更全面和精确地计算光辐射通过二维机械准直器的衍射,应用它将可以分析二维机械准直器的各种性能,并进行性能的优化。

参 考 文 献

- John F. McGrath, Jr. New technique for the design of an extreme ultraviolet collimator[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 1968, **39**(7): 1036~1038
- John F. McGrath, Jr., Martin Harwit. A wide-spacing mechanic collimator[J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(4): 837~
- G. Schmidtke. Diffraction filter in XUV spectroscopy[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(2): 447~450
- Robert P. McCoy, Kenneth F. Dymond. Special sensor ultraviolet limb imager: an ionospheric and neutral density profiler for the defense meteorological satellite program satellites [J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(2): 423~429
- S. E. Thonnard, S. N. Osterman, R. P. McCoy *et al.*. Optical calibration of the special sensor ultraviolet limb imager (SSULI) [C]. *Proc. SPIE*, 1994, **2282**: 98~106
- Zhang Mingli, Liu liren, Wan Lingyu *et al.*. Method of CCD scan for collimation testing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1067~1071 (in Chinese)
张明丽,刘立人,万玲玉等. CCD扫描检测光束准直度[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1067~1071
- Dong Hongzhou, Shi Shunxiang, Li Jiali *et al.*. Study on collimation properties of semiconductor laser off-axis beams[J].

- Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 851~853 (in Chinese)
董洪舟,石顺祥,李家立等. 半导体激光器远轴光束的准直特性研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 851~853
- 8 Zhong Minlin, Yang Lin, Liu Wenjin *et al.*. Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 482~486 (in Chinese)
钟敏霖,杨 林,刘文今等. 激光快速直接制造 W/Ni 合金太空望远镜准直器[J]. 中国激光, 2004, **31**(4): 482~486
- 9 Liang Pei. Study on collimation property of off-axis parabolic mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 909~913 (in Chinese)
梁 培. 离轴抛物镜准直特性的研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(6): 909~913
- 10 Tang Xionggui, Guo Yongkang, Du Jinglei *et al.*. Analysis of diffractive image field in thick film photo-resist by using Fourier modal method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 246~250 (in Chinese)
唐雄贵,郭永康,杜惊雷等. 利用傅里叶模方法分析厚层光刻胶内衍射光场[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 246~250
- 11 Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Mao Hongwen *et al.*. Laser collimation method based on the drift feedback control[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 373~377 (in Chinese)
赵维谦,谭久彬,马洪文等. 漂移量反馈控制式激光准直方法[J]. 光学学报, 2004, **24**(3): 373~377
- 12 Charles A. Lindsey. Effects of diffraction in multiple-grid telescopes for X-ray astronomy[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(12): 1708~1715
- 13 R. L. Blake, D. M. Barrus, E. Fenimore. Diffraction effects on angular response of X-ray collimator [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 1976, **47**(8): 899~905
- 14 Robert L. Lucke, Stefan E. Thonnard. Stacked-grid collimators described with dimensionless parameters[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(4): 616~621
- 15 Anna-Clare Milazzo, Stefan Thonnard, Chau Lam. Performance measurements and results of the SSULI (special sensor ultraviolet limb imager) stacked-grid collimator[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3443**: 7~18

LASER2007' Harbin

第十八届全国激光学术会议第一轮通知

中国光学学会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十八届全国激光学术会议,定于2007年8月在黑龙江哈尔滨举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、新概念、新技术的交流平台,促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名院士和著名专家到会作大会报告,各分会设立高水平的邀请报告。欢迎积极投稿,踊跃参加。同时欢迎各公司、企事业单位刊登广告、到会展示科技成果产品和发布信息。

会议时间: 2007年8月,会期4天

会议地点: 中国·黑龙江·哈尔滨

主办单位: 中国光学学会、中国电子学会

承办单位: 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室

名誉主席: 周炳琨院士

会议主席: 范滇元院士、周寿桓院士

会议副主席: 姚建铨、彭堃堦、朱健强、王 骥、王树国

秘书长: 陈德应

会议主题/征稿范围: 1) 激光物理(激光器动力学、激光等离子体物理、X光激光、激光光谱等); 2) 非线性光学与量子光学; 3) 全固态激光器及新型激光器; 4) 激光信息及处理技术; 5) 激光生物与激光医学; 6) 工业激光及其应用; 7) 激光材料、薄膜及元器件; 8) 光束传输、控制及光束特性

征文要求: 将500~800字摘要(用于审稿)和300字提要(用于出版)各一份,以电子邮件附件的形式发送至: Laser2007@hit.edu.cn,摘要应能准确反映研究成果的创新点,包括研究目的、方法结果、结论等内容。不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文,提交截稿日期为2007年5月31日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail等)、关键词3~6个。题目用小三号黑体,摘要用宋体小四号字按word格式编排,务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮寄件。

会议将推荐优秀论文,在《中国激光》上正式发表。

会议秘书组联系人及联系电话:

陈德应 0451-86402837,何伟明 0451-86412710-214,

程元丽 0451-86402920,王春晖 0451-86402910,王瑞环 0451-86413164

传真:0451-86413164,E-mail:Laser2007@hit.edu.cn,网页:www.Laser2007.hit.edu.cn

地址:黑龙江哈尔滨南岗区一匡街2号哈工大科学园3031信箱(王瑞环收),邮编:150001

中国光学学会激光专业委员会

中国电子学会量子电子学与光电子学分会

哈尔滨工业大学

可调谐激光技术国家级重点实验室

哈尔滨工业大学光电子技术研究所(代章)

二〇〇七年一月二十二日