

文章编号: 0258-7025(2004)10-1183-05

# 高斯光束变换成方形均匀焦斑的 衍射光学元件的研究

张 艳, 张静娟\*, 司徒国海

(中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 采用二维加权串行迭代算法(WSD)设计了 8 台阶的衍射光学元件(DOE)进行激光光束整形,将圆形高斯激光束变换为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 的方形均匀焦斑,同时满足了二维激光光束形状的改变及振幅分布均匀化的功能;应用到高密度全息存储中,实现了入射到记录材料上焦斑强度的均匀分布。模拟计算结果表明,转换到均匀区的能量效率达到 91.2%,平顶区的不均匀度为 4.6%,误差小于 0.023%,基本上达到了设计的要求。同时分析了衍射光学元件对入射高斯光束的束腰半径及傅里叶变换透镜焦距的宽容度,还制作出了 8 台阶量化相位衍射光学元件的三套掩模板。

**关键词** 几何光学;衍射光学元件;光束整形;二维加权串行迭代算法

**中图分类号** O 438 **文献标识码** A

## Investigation on Diffractive Optical Elements for Converting Gaussian Beam into Square Uniform Focused Spot

ZHANG Yan, ZHANG Jing-juan, SITU Guo-hai

(The Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** A diffractive optical element (DOE) with 8 levels is designed to implement the wavefront transformation with two-dimensional weighed serial iterative algorithm. The DOE converts a circular-Gaussian laser beam into a  $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$  flat-top square focused spot, which realizes the transformation of beam-shape and the uniform distribution of the amplitude at the same time. The DOE is applied to high-density holographic storage, and it meets the needs of the uniform distribution of the incident focused spot. The simulated results show that the energy transformation efficiency is up to 91.2%, the uniformity error is 4.6%, and the error is below 0.023%, which nearly satisfy the need. The tolerance of the incident beam and the focus is analyzed too. Three sets of masks on 8 levels phase DOEs have been processed.

**Key words** geometric optics; diffractive optical elements; beam shaping; two-dimensional weighed serial iterative algorithm

## 1 引 言

高密度全息存储由于其高存储容量和信息存取  
的并行特性,越来越受到关注<sup>[1~3]</sup>。全息图是通过  
参考光束和携带信息的物光束在记录介质上发生干

涉而形成的,但是激光束一般是高斯分布的,强度分  
布不均匀,直接影响存储的质量,同时由于光斑是圆  
形的,不能有效地利用存储空间。为了改善入射到  
记录介质上光斑的质量,提高存储密度,我们在参考  
光束中加入一个衍射光学元件(DOE),将圆形高斯

收稿日期:2003-06-02;收到修改稿日期:2003-10-23

基金项目:国家自然科学基金(编号:69977018,60277027)资助项目。

作者简介:张 艳(1978),女,中国科学院研究生院硕士研究生,研究方向为衍射光学元件的设计与应用。E-mail:hebzy255@sohu.com

\* 通信联系人。E-mail:jjzhang@gscas.ac.cn

光束整形为方形均匀焦斑。

目前,已经提出了多种衍射光学元件的设计方法<sup>[4~14]</sup>,其中高斯算法(Gerchberg Saxton)等局部搜索的方法计算时间较短,但对初值的依赖性很强,模拟退火算法等全局搜索的方法虽避免了对初值的依赖性,但搜索的速度较慢,计算时间比较长,当设计的问题是二维时,这一缺点尤为突出。为解决复杂衍射光学元件的设计问题,我们应用的是二维加权串行迭代(WSI)算法<sup>[15]</sup>。用该算法实现了高密度全息存储中入射到记录材料上的焦斑强度均匀分布,将圆形高斯激光光束整形为  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  的方形均匀焦斑。

## 2 设计原理及算法描述

光束整形本质上是一个给定输入输出,求解逆衍射的问题。为实现高斯光束向方形均匀焦斑的变换,可采用如图 1 所示的傅里叶光学系统。图中  $P_1$  为输入平面, $P_2$  为谱平面,衍射光学元件放在  $P_1$  平面上,其相位为  $\phi(x, y)$ ,  $f(x, y)$  为输入光波。设计衍射光学元件的关键就是寻求最优的  $\phi(x, y)$ ,通过衍射光学元件调制  $f(x, y)$ ,使  $P_2$  平面上最终输出的实振幅分布  $|g(\xi, \eta)|$  与要求的特定实振幅  $|g_{\text{obj}}(\xi, \eta)|$  之间的误差尽可能达到最小。

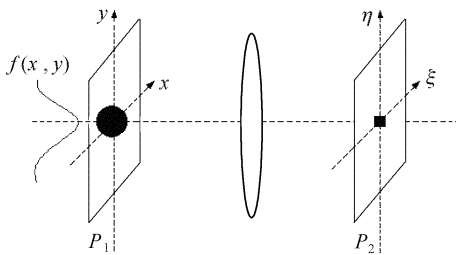


图 1 设计的衍射光学元件的光学系统  
Fig. 1 Optical system of designing DOE

加权串行迭代算法的内核是高斯算法,外部通过加权方法将理想的目标函数分解成子目标函数集合,具体的实现方法如下:

首先将理想的目标函数  $g_{\text{obj}}(\xi, \eta)$  进行傅里叶正变换,得到其频谱  $G_{\text{obj}}(u, v)$ ;接着引入一个加权函数序列  $\{H_n(u, v)\}$ ,  $n = 0, 1, \dots, N$ ,用该序列中的函数依次和  $G_{\text{obj}}(u, v)$  相乘,当  $n = 0$  时,  $H_0(u, v) \times G_{\text{obj}}(u, v) = G_0(u, v)$ ,得到  $G_{\text{obj}}(u, v)$  的低频分量  $G_0(u, v)$ ,构成第一个子目标函数的频谱;再将  $G_0(u, v)$  进行傅里叶逆变换,就得到第一个子目标

函数  $g_0(\xi, \eta)$ ;随  $n$  逐步增大,加权函数与  $G_{\text{obj}}(u, v)$  相乘后得到的子目标函数频谱中包含的  $G_{\text{obj}}(u, v)$  成分也就随之增多,将其进行傅里叶逆变换后得到的子目标函数就越接近于理想的目标函数。当  $n = N$  时,  $H_N(u, v) \times G_{\text{obj}}(u, v) = G_N(u, v)$ ,  $G_N(u, v) \rightarrow G_{\text{obj}}(u, v)$ ,对  $G_N(u, v)$  进行傅里叶逆变换得到的子目标函数:  $g_N(\xi, \eta) \rightarrow g_{\text{obj}}(\xi, \eta)$ 。这样就得到一系列子目标函数  $g_0(\xi, \eta), g_1(\xi, \eta), \dots, g_N(\xi, \eta)$ ,尤其是当理想目标函数比较复杂时,这样进行分解是很有必要的,它将一个复杂的函数分解成一系列由简单到复杂的子函数。因而,对理想目标函数的求解也就转变成对子目标函数序列  $\{g_n(\xi, \eta)\}$  的求解。对于其中每一个子目标函数的求解,我们采用高斯算法,首先以随机初始相位和输入面光场的复振幅开始,作傅里叶正变换,得到的谱函数其相位保持不变,实振幅用子目标函数的实振幅取代;然后作傅里叶逆变换,得到的复振幅仍保持相位不变,实振幅用输入函数的实振幅代替,接着作傅里叶正变换,……,如此循环直至得到满意结果。用高斯算法求解第一个子目标函数所得的相位分布记为:  $\phi_1(x, y)$ ;当求解第二个子目标函数时,就将  $\phi_1(x, y)$  作为用高斯算法进行优化计算的初始相位,……,当求解第  $N$  个子目标函数即理想目标函数时,就用第  $N - 1$  个子目标函数的最优解  $\phi_{N-1}(x, y)$  作为初始相位来计算,最终得到所求衍射光学元件的最佳相位分布  $\phi(x, y)$ 。

## 3 模拟计算结果

用加权串行迭代算法设计衍射光学元件,将圆形高斯激光束整形为正方形均匀分布的焦斑,具体应用到高密度全息存储所需的强度均匀分布中。设计参数如下:

照明光波波长  $\lambda = 532\ \text{nm}$ ,透镜的焦距为  $f = 50\ \text{mm}$ ,输出面上正方形焦斑的尺寸为  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ,输入、输出面上的采样点数均为  $64 \times 64$ 。

输入光波为圆形高斯光束,表达式为

$$f(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/w_0^2] \quad (1)$$

其中,高斯光束的束腰半径  $w_0 = 0.96\ \text{mm}$ 。

针对设计要求,输出面应得到边长为  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  的方形均匀焦斑,在这里用束腰半径为  $5\ \mu\text{m}$  的超高斯光束来实现,表达式为

$$g(\xi, \eta) = \exp\left\{-\left[\left(\frac{\xi}{0.005}\right)^{20} + \left(\frac{\eta}{0.005}\right)^{20}\right]\right\} \quad (2)$$

针对理想目标函数频谱的性质,采用(3)式所定义的高斯序列作为加权函数,表达式如下

$$H_n(u, v) = \exp[-(x^2 + y^2)/(0.007 \times 1.5^n)] \quad (3)$$

式中,起始加权函数的束腰半径为 0.707 mm,以后每个加权函数的束腰半径均是前者的 1.5 倍,调制次数  $n=0,1,2,\dots,7$ 。采用加权串行迭代算法求解衍射光学元件的相位分布,经过模拟计算,得到图 2 所示的 8 台阶量化相位分布。

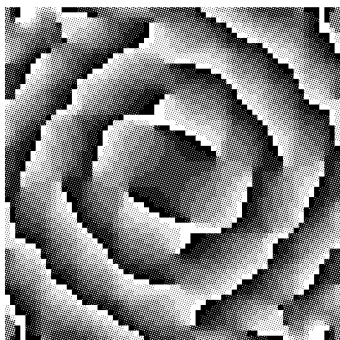


图 2 8 台阶量化相位分布图

Fig. 2 Phase distribution with 8 levels

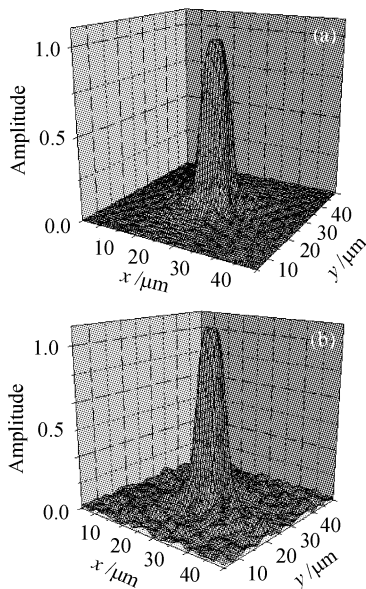


图 3 衍射光学元件相位输出结果

(a) 连续输出; (b) 8 台阶量化输出

Fig. 3 Output results with DOE phase

(a) continuous phase output; (b) 8 levels phase output

当设计的衍射光学元件相位是连续分布时,在谱平面上得到正方形均匀焦斑的三维立体图如图 3 (a)所示,图 3(b)表示的是对衍射光学元件相位进行 8 台阶量化后得到的方形均匀焦斑的三维立体图,图 4 中(a),(b)分别是图 3(b)中的结果沿  $x$  轴

和  $y$  轴方向的截面分布图。

从图 3(a)中可以看出,相位分布取连续值时,输出的正方形焦斑的顶部均匀区比较大,边缘比较陡直,旁瓣抑制也比较好;图 3(b)中由于将相位量化后会导致求解的空间变小,因而输出结果要稍逊于连续相位的结果,但是在均匀区的能量转换效率也达到了 91.3%,平顶区的不均匀度为 4.6%,误差也控制在了 0.023%,从图 4 给出的沿  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的截面图不难看出其结果还是比较理想的,基本上达到了设计的要求。表 1 给出了反映输出光斑质量的三个参数:误差值 Err,均匀区内能量转换效率  $\eta$  和顶部不均匀度  $\sigma$  的计算结果。

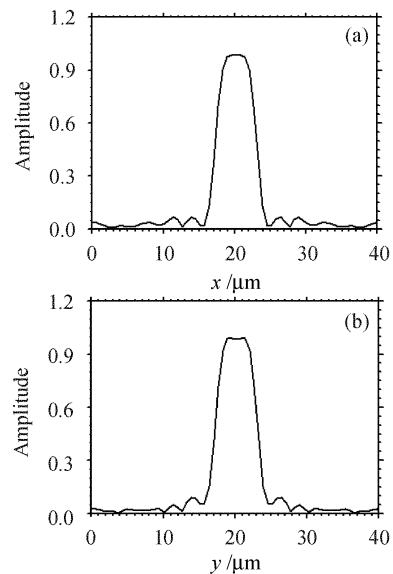


图 4 8 台阶量化相位输出结果

(a) 沿  $x$  方向分布图; (b) 沿  $y$  方向分布图

Fig. 4 Output results with 8 levels phase

(a) distribution along  $x$ -axis; (b) distribution along  $y$ -axis

表 1 模拟计算结果

Table 1 Simulated results

Results	Err/%	$\eta$ /%	$\sigma$ /%
Continuous phase	0.015	95.3	3.8
Quantified phase with 8 levels	0.023	91.2	4.6

表中,Err,  $\eta$ ,  $\sigma$  的定义如下

$$\text{Err} = \frac{1}{L \times J} \sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^J [ |g_{\text{obj}}(\xi_i, \eta_j)| - |g(\xi_i, \eta_j)| ]^2 \quad (4)$$

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q |g(\xi_i, \eta_j)|^2}{\sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^J |g_{\text{obj}}(\xi_i, \eta_j)|^2} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{1}{P \times Q} \left[ \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q \frac{|I(\xi_i, \eta_j) - \bar{I}|}{\bar{I}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

这里,  $\bar{I} = [\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q I(\xi_i, \eta_j)] / (P \times Q)$ ,  $I(\xi_i, \eta_j)$  为输出面均匀区内采样点的光强值,  $g(\xi_i, \eta_j)$  为实际输出振幅分布的第  $(i, j)$  个样点值,  $g_{\text{obj}}(\xi_i, \eta_j)$  为理想目标函数的第  $(i, j)$  个样点值,  $L, J$  为输出面的采样点总数,  $P, Q$  为输出面均匀区内的采样点个数。

此外,在全息存储的具体实验中,考虑到参考光路中放置衍射光学元件的位置应该有一定的宽容度,也就是对于入射的照明光波,高斯光束的束腰半径应该可以在一个小区域而不仅仅是某一个特定值时,在焦平面的记录介质上能得到一个比较满意的方形均匀焦斑,因此对设计的 8 台阶量化相位的衍射光学元件进行了宽容度的分析,计算结果表明,当高斯光束的束腰半径在  $0.96 \pm 0.1 \text{ mm}$  的范围内时,输出波形的变化不大,均匀区的能量转换效率保持在 91% 左右,误差限制在 0.03% 之内,顶部不均匀度小于 4.8%;同时,考虑到实验中采用的是傅里叶变换系统,因而需要对焦距的宽容度进行分析,计算结果表明,焦距在  $50 \pm 5 \text{ mm}$  的范围内,焦平面上输出的方形均匀焦斑能满足设计的要求,表征输出

光束质量的三个物理量  $\text{Err}, \eta, \sigma$  的变化也比较小。这说明了设计的 8 台阶相位量化的衍射光学元件在高密度全息存储中的适应能力比较强,能够较好地应用到具体的实验中。

#### 4 掩膜板的设计

为了使用半导体微细加工工艺来制作衍射光学元件,需要将相位进行量化,制出掩膜板。以前面所计算的 8 台阶相位量化为例,每一点的相位值就可以用一个 3 位二进制数表示,如  $(0 \times 2\pi/8)$  用 0 0 0 表示,  $(7 \times 2\pi/8)$  用 1 1 1 来表示。

用离子刻蚀工艺制备衍射光学元件时,对第  $i$  块掩膜板要求的刻蚀深度为

$$d_i = \frac{\lambda}{2^i(n-1)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

其中  $\lambda$  为波长,  $n$  为材料的折射率,选择的刻蚀材料为石英,则  $n = 1.458$ ,全息存储中的照明光波波长为 532 nm,代入(7)式中,得到三块掩膜板的刻蚀深度分别为:  $d_1 = 0.58 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 0.29 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 0.145 \mu\text{m}$ 。图 5 给出了制作 8 台阶量化相位衍射光学元件的三套掩膜板。

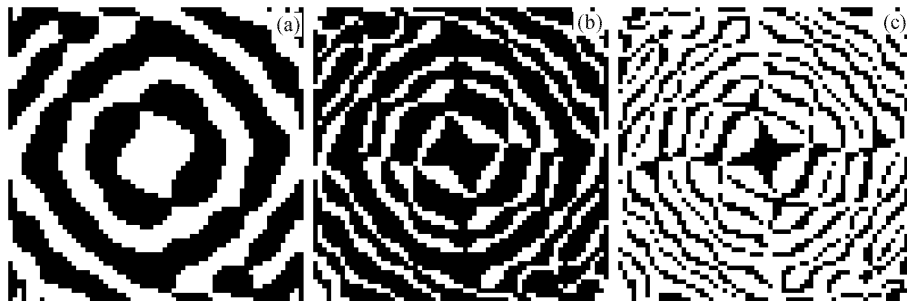


图 5 制作衍射光学元件的掩膜板图

(a) 第一块掩膜板; (b) 第二块掩膜板; (c) 第三块掩膜板

Fig. 5 Mask of making DOE

(a) the first mask; (b) the second mask; (c) the third mask

#### 5 结 论

二维加权串行迭代算法能把一个复杂问题化解为一系列较容易实现的简单问题,既减少了像高斯算法等局部搜索算法那样对初始相位的过度依赖,又不会像模拟退火算法等全局搜索算法那样随着设计问题的二维化使搜索速度极端缓慢,因而该算法更适合于复杂光束整形的衍射光学元件设计,具有较大的普遍性。为适应高密度全息存储中对入射到记录材料上焦斑强度分布均匀性的需要,结合实际

的参数,用此算法设计的波前变换系统将圆型高斯激光束变换成  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  正方形均匀焦斑,均匀区的能量转换效率达到了 91.2%,平顶区的不均匀度为 4.6%,输出波形边缘比较陡直;并进一步分析了所设计的 8 台阶相位量化的衍射光学元件在全息存储实验中对衍射光学元件的对准范围和透镜焦距的宽容度;做出了掩膜板图,可以进行实际的加工。

#### 参 考 文 献

1 Zhou Yan, Tao Shiquan, Wang Dayong *et al.*. Pattern

- recognition algorithms based on volume holographic image-databases [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):359~362
- 周 雁,陶世荃,王大勇等. 基于体全息图像库的模式识别算法[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4):359~362
- 2 Zhang Peikun, Jin Guofan, He Qingsheng *et al.*. A new multiplexing for volume holographic storage using dynamic speckle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9):1124~1127
- 张培琨,金国藩,何庆声等. 利用动态散斑实现体全息存储的新型复用技术[J]. *光子学报*, 2001, **30**(9):1124~1127
- 3 Shao Bing, He Shurong, Wu Minxian *et al.*. Matching and relationships between input and output signals in VHDSS [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6):645~649
- 邵 冰,何树荣,邬敏贤等. 体全息存储系统输入输出信号匹配关系研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6):645~649
- 4 R. W. Gerchberg, W. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and plane picture [J]. *Optik*, 1972, **35**:237~246
- 5 Liang Wenxi, Zhang Jingjuan, Lü Junfeng *et al.*. Designing a diffractive optical element for controlling the beam profile in a three-dimensional space using the simulated annealing algorithm [J]. *Chinese Physics*, 2001, **10**(12):1129~1135
- 6 Guangya Zhou, Xiaolin Zhao, Zongguang Wang *et al.*. Optimization design of diffractive optical elements by genetic local search algorithms [C]. *SPIE*, 1999, **3740**:222~226
- 7 Martin Meister, Richard J. Winfield. Novel approaches to direct search algorithms for the design of diffractive optical elements [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**:39~49
- 8 Xie Jing-hui, Liu Xi-yu. Design of binary optical elements bottom on DPTV algorithm [J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(3):225~227
- 谭敬辉,刘锡宇. 基于DPTV算法的二元光学元件设计[J]. *光学技术*, 2000, **26**(3):225~227
- 9 Lu Jianye, Li Qi, Dong Yunhua *et al.*. Direct design of quantized DOEs by genetic simulated annealing algorithm [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(4):365~367
- 鲁建业,李 琦,董蕴华等. 采用混合遗传-模拟退火算法对DOE的直接设计[J]. *光电子•激光*, 2001, **12**(4):365~367
- 10 Lu Junfeng, Zhang Jingjuan, Zhang Yan *et al.*. Designing a diffractive optical element used as a ring-beam convector to control the wave-front propagation in a three-dimensional space [C]. *SPIE*, 2002, **4928**:288~296
- 11 Tian Kehan, Yan Yingbai, Tan Qiaofeng. Two kinds of improvement on Yang-Gu algorithm for the design of diffractive optical element used for beam shaping [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):307~312
- 田克汉,严瑛白,谭峭峰. YG算法设计衍射光学光束整形器件的两种改进[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4):307~312
- 12 Wei Huang, Xiaodong Zeng, Yuying An. Study on the beam shaping of high-power laser diode bars [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(8):475~476
- 13 Wang Wei, Pei Min, Li Yongping *et al.*. Analysis of application properties of diffractive optical elements fabricated by continuous technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):41~46
- 王 炜,裴 珉,李永平等. 连续工艺衍射光学元件的应用特性分析[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1):41~46
- 14 Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei *et al.*. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(9):1107~1111
- 陈怀新,隋 展,陈祯培等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. *光学学报*, 2001, **21**(9):1107~1111
- 15 Zhang Jingjuan, Zhang Yan, Lu Junfeng *et al.*. The design of diffractive optical elements with weighted interactive algorithm [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(12):1207~1210
- 张静娟,张 艳,吕俊峰等. 用加权串行迭代算法设计衍射光学元件[J]. *光电子•激光*, 2002, **13**(12):1207~1210

## 欢迎订阅 2005 年《硅酸盐学报》

《硅酸盐学报》是中国硅酸盐学会主办的有关无机非金属材料领域的综合性学术期刊。1957年创刊,国内外公开发行人。《硅酸盐学报》为EI核心期刊,CA,SA,PЖ收录期刊。

《硅酸盐学报》的任务是报道水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料、人工晶体及非金属矿等各专业在科研、教学、生产、设计方面具有创新性的研究成果,以促进国内外学术交流,为我国四个现代化建设服务。读者对象主要是有关专业工作者及大专院校师生。

《硅酸盐学报》具有正式广告经营许可证。证号为:京海工商广字 0583 号。承办上述专业有关的国内外广告、发布外商来华广告。包括单位介绍和新研究成果、新材料、新产品、新工艺介绍、科技简讯等。《硅酸盐学报》竭诚为各界服务。

《硅酸盐学报》为月刊,国际标准大 16 开,正文 128 页,单价 25 元,全年 12 期共 300 元。邮发代号 2-695。全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系。

地址:北京百万庄中国硅酸盐学会《硅酸盐学报》编辑室 邮编:100831

电话:(010)88376444 传真:(010)68342016

E-mail:jccs@ceramsoc.com

Http://www.ceramsoc.com