

# 应用互易定理优化法设计光通信光栅

张善文 营建新 高键翔

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要** 光栅作为光通信系统中的色散型波分复用器,系统通常要求其在近掠入射条件下具有高衍射效率,传统设计方法给出的光栅闪耀角大,工艺上不易实现。基于光栅电磁场理论,提出用光栅互易定理计算光栅槽形初始值,结合衍射效率等高线法优化光栅槽形的设计方法—互易定理优化法。结果表明,C波段 TM 波-1 级峰值衍射效率理论值为 94.9%,测量值为 92.1%。较传统光栅设计方法,互易定理优化法的应用降低了光通信光栅的制作难度,提高了衍射效率,为掠入射光栅的研制提供了更好的途径。

**关键词** 光栅;衍射;互易定理;波分复用;衍射效率;C 波段;刻划光栅

**中图分类号** O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0305001

## Design Optical Fiber Telecommunication Grating Using Reciprocity Theorem Optimized Method

Zhang Shanwen Ying Jianxin Gao Jianxiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** As a dispersing-type wavelength division multiplexer in optical fiber telecommunication, generally, grating needs to have high diffraction efficiency in near grazing incidence. According to traditional design method, optical fiber communication grating whose blazing angle is large is hard to be manufactured technically. Based on grating electromagnetic theory, a design idea that makes use of grating reciprocity theorem to compute initializing value of grating groove, combined with diffraction-efficiency contour method to optimize grating groove, is presented. The results show that theoretical efficiency peak of -1 order of TM wave is 94.9% and measuring peak can reach 92.1% in C band. Compared to traditional design method, reciprocity theorem optimized method that reduces the degree of difficulty of manufacturing grating and improves diffraction efficiency, provides a better path of developing grating in near grazing incidence.

**Key words** gratings; diffraction; reciprocity theorem; wavelength division multiplexing; diffraction efficiency; C band; ruled grating

**OCIS codes** 050.1950; 050.1960; 050.2770

## 1 引 言

光纤通信是当今世界上发展最快的领域之一,在通信网、广播电视网、计算机网以及其他数据传输系统中都得到了广泛的应用,尤其是 IP 业务发展突飞猛进,迫切需要迅速提高通信的速度和容量<sup>[1]</sup>。传统的传输网络扩容方法包括空分多路复用(SDM)和时分多路复用(TDM)两种,其基本的传输

网络均采用单一波长的光信号传输,这种传输方式是对光纤容量的浪费,因为光纤的带宽相对于目前利用的单波长信道来讲几乎是无限的<sup>[2]</sup>。波分复用(WDM)技术在这样的背景下应运而生,它不仅大幅度地增加了网络的容量,而且充分利用了光纤的带宽资源,减少了网络资源的浪费。其基本原理是在发送端将不同波长的光信号组合起来(复用),并

**收稿日期**: 2012-09-12; **收到修改稿日期**: 2012-09-25

**基金项目**: 国家重大科研装备研制项目(ZBYZ2008-1)和中国科学院"优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金"资助课题。

**作者简介**: 张善文(1980—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光栅设计及光栅制作技术等方面的研究。

E-mail: zhshwen007@sina.com

耦合到光缆线路上的同一根光纤中进行传输,在接收端又将组合波长的光信号分开(解复用),并作进一步处理,恢复出原来信号后进入不同的终端<sup>[3]</sup>。

光波分复用器件是 WDM 系统的核心器件,在超高速、大容量的 WDM 系统中起着关键作用,其性能的优劣对系统传输质量有决定性的作用,系统要求器件具有低插入损耗、低窜扰、通带平坦、复用路数多、温度稳定性好以及尺寸小等性能<sup>[4~6]</sup>。WDM 器件主要分为由滤波器组成的级联型和色散型,级联型包括介质薄膜干涉型、光纤耦合型和马赫-曾德尔干涉型,适合用于通道数较少的系统。色散型主要包括体光栅色散型和集成平面色散型,适用于多通道、大容量系统,体光栅色散型的优点是自由空间中传播损耗小、通道数多,缺点是结构复杂、体积大且封装困难;集成平面色散型 WDM 器件由于具有波长间隔小、信道数量多、通带平坦和易于光纤耦合等优点,是现在研究的热门课题之一,其主要包括蚀刻衍射光栅、阵列波导光栅和平面闪耀光栅三种类型,其中平面闪耀光栅的优化和制作方法较多、工艺实现相对容易<sup>[7~10]</sup>,本文主要研究如何优化设计工艺上易于实现的此种光栅。

C 波段红外窗口中心波长为  $1.55\mu\text{m}$ ,有较大的功率承载能力,可以有效地克服非线性,适用于 WDM 技术网络。美国 Newport 公司、Horriba-JY 公司和 Headwall 公司<sup>[11]</sup>在高衍射效率 C 波段光通信光栅的研制方面较为成熟,Headwall 公司光栅峰值衍射效率可达到 92%。以光通信上常用的一种 1200 line/mm、近掠入射光栅为例,按照传统闪耀光栅设计方法,得到的光栅闪耀角较大,无论采用机械刻划的方式还是离子束刻蚀全息的加工方式,制作难度都非常大。本文提出了利用光栅的互易定理计算光栅槽形初始值、结合衍射效率等高线法<sup>[12]</sup>优化光栅槽形的设计方法,简称为互易定理优化法。

## 2 光栅槽形优化设计理论基础

### 2.1 光栅方程及符号规定

光栅方程是光栅理论中最重要的表达式,直观地给出了入射波光栅所能产生的衍射级次的数目与方向,其在直角坐标系下数学表达式为

$$\sin \theta_m = \sin \theta_i + m \frac{\lambda}{d}, \quad (1)$$

式中  $\theta_m$  为衍射角,  $\theta_i$  为入射角,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  为衍射级次,  $\lambda$  为入射波长,  $d$  为光栅常数。判断入射角或一个衍射级次及其角度的正负,只需认定  $x$  轴

的正方向。若入射光(衍射光)的波矢在  $x$  轴正方向的投影为正,则与其相应的入射角(衍射角)就是正的,反之是负的;若衍射级次的方向比 0 级更靠近  $x$  轴正方向,则它的级次编号是正的,反之是负的,如图 1 所示。

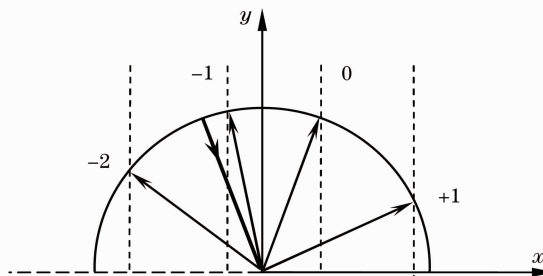


图 1 光栅方程符号规定示意图

Fig. 1 Schematic of symbol definition of grating equation

### 2.2 传统设计方法

光栅闪耀是指把大部分入射光的能量集中到一个非 0 衍射级次上的现象。由于要保证光栅具有相对较宽的光谱范围和避免级次重叠,所以约 90% 的光栅都使用 -1 级。光栅闪耀是光栅设计者和制造者所追求的目标。传统反射式(透射式)闪耀光栅设计的核心思想是要求反射定律(折射定律)与光栅方程之间的协调一致<sup>[13]</sup>。以反射式光栅为例,如图 2 所示,入射光入射到光栅表面后衍射成 0 级和 -1 级,各级次衍射光遵守光栅方程,  $N$  和  $N'$  分别为光栅法线和光栅工作面法线,同时 -1 级衍射光和入射光相对于  $N'$  满足反射定律,此时 -1 级衍射光具有闪耀的特征。由图 2 的几何关系给出光栅的闪耀条件如为

$$\alpha = \frac{\theta_i - \theta_m}{2}, \quad (2)$$

式中  $\alpha$  为光栅的闪耀角(图 2 中周期性三角形的左底角),它对光栅衍射光的分布起着关键性的作用,特别地,在自准直设置下,  $\alpha = \theta_i$ ,入射光和 -1 级衍

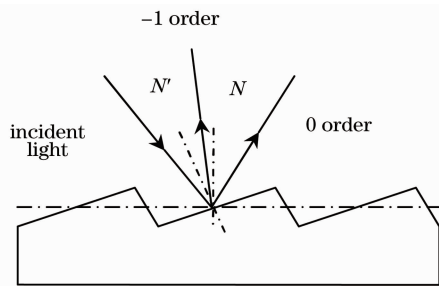


图 2 光栅 -1 级衍射光闪耀示意图

Fig. 2 Schematic of grating with -1 order blazing of diffracted light

射光的夹角为  $0^\circ$ ，此时的入射状态被称为  $-1$  级 Littrow 状态，是阶梯型闪耀光栅的常用方式，此时三角形的槽顶角  $\varphi$  (图 2 中三角形的顶角) 常被刻成  $90^\circ$ ，以提高衍射效率。

根据光学系统结构的要求，本文设计的光通信光栅刻槽密度选取为  $1200 \text{ line/mm}$ ，光栅表面材料为金属铝、入射光中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ 、偏振状态为 TM 偏振、入射角度为  $76^\circ$ ，使用的闪耀级次为  $-1$  级，入射状态如图 3 所示，入射光与  $-1$  级衍射光的夹角为  $13.2^\circ$ 。根据(1)式和(2)式求得光栅的闪耀角  $\alpha = 69.4^\circ$ ，由光栅电磁场理论计算了中心波长  $1.55 \mu\text{m}$  的衍射效率值为  $91.4\%$ ，但具有  $69.4^\circ$  闪耀角的阶梯型闪耀光栅作难度较大，工艺上不易实现。

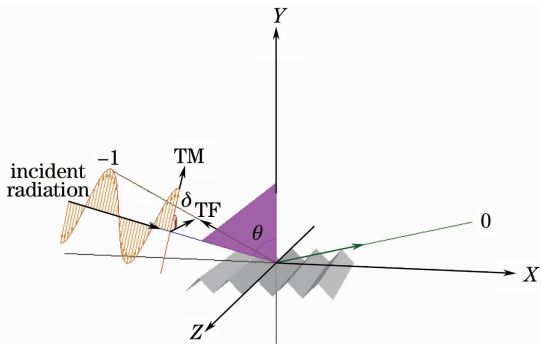


图 3  $1.55 \mu\text{m}$  TM 偏振光以  $76^\circ$  入射到  $1200 \text{ line/mm}$  光通信光栅表面

Fig. 3  $1.55 \mu\text{m}$  light in TM polarization with  $76^\circ$  incident angle enters the surface of optical fiber telecommunication grating with  $1200 \text{ line/mm}$

### 2.3 光栅互易定理优化法

$-1$  级 Littrow 入射条件在光栅的应用和理论上都占有非常重要的地位，该条件下有个著名的互易定理<sup>[14]</sup>，定理阐述如下：

1) 当一束 TM 平面波垂直入射到一理想导体三角槽形光栅的一个斜面上时，如果另一斜面的长度是半波长的整数倍，且这个光栅的槽顶角为  $90^\circ$ ，那么，这时光栅第  $m$  级衍射波的衍射效率是  $100\%$ 。这个定理也叫 Maréchal-Stroke 定理。

2) 当一束 TM 平面波以  $90^\circ - \alpha$  的入射角在  $-1$  级 Littrow 状态下入射到闪耀角为  $\alpha$  的阶梯光栅上时，如果  $\lambda/d > 2/3$ ，那么  $-1$  级衍射波的衍射效率是  $100\%$ 。

由互易定理可以得到，在  $\lambda/d > 2/3$  的波段范围内，闪耀角互为余角的两个光栅在  $-1$  级 Littrow 状态入射下具有相同的衍射效率。 $-1$  级 Littrow 入射条件下光栅的衍射效率最具有代表性，其他入射条件可以看成是该状态下的近似，详细研究此入射

状态下光栅的衍射效率对光栅的设计会起到事半功倍的作用。

本文设计的光栅， $\lambda/d \approx 0.93 > 2/3$ 、入射光与  $-1$  级衍射光的夹角为  $13.2^\circ$ ，属于  $-1$  级偏 Littrow 入射，光栅表面材料为铝，除有小部分吸收外光学性能接近理想导体，以上条件近似满足互易定理，因此闪耀角互为余角的两种光栅具有相近的衍射效率。根据这个近似，由传统设计方法得到的  $69.4^\circ$  闪耀角计算其余角为  $20.6^\circ$ ，两种闪耀角光栅应具有相似的衍射效率，在光栅槽顶角都为  $90^\circ$  的情况下，由光栅电磁场理论中的坐标变换法(C 方法)计算得到  $1.55 \mu\text{m}$  处 TM 波  $-1$  级衍射效率分别为  $91.4\%$  和  $92.9\%$ 。

可以看出互易定理的结果要高于传统设计方法。上述情况近似满足互易定理，得到衍射效率并非最优值，但是可以作为严格理论做优化设计的初始点(闪耀角为  $20.6^\circ$ ，槽顶角为  $90^\circ$ )。光栅衍射效率直接受槽形影响，而闪耀光栅的槽形以三角槽形为主，三角槽形的闪耀角和槽顶角同时决定衍射效率，衍射效率等高线法<sup>[12]</sup>给出的等高线图直接给出两者与衍射效率的定量关系。因此，将互易定理与衍射效率等高线法结合优化设计光栅。如图 4 所示，以闪耀角  $20.6^\circ$  和槽顶角  $90^\circ$  的光栅作为优化初始点，闪耀角取值范围  $16^\circ \sim 34^\circ$ ，槽顶角取值范围  $85^\circ \sim 128^\circ$ ，计算 TM 波  $-1$  级衍射效率，得到最大值或最优值为  $94.9\%$ ，对应的闪耀角最优值为  $27^\circ$ 、槽顶角最优值为  $119.5^\circ$ 。图中深红色的曲面为衍射效率大于  $94\%$  的区域，对应的闪耀角跨度较大，取值范围为  $21^\circ \sim 34^\circ$ ，槽顶角为  $100^\circ \sim 125^\circ$  的钝角。这一结果不同于常用闪耀光栅和中阶梯光栅，对于

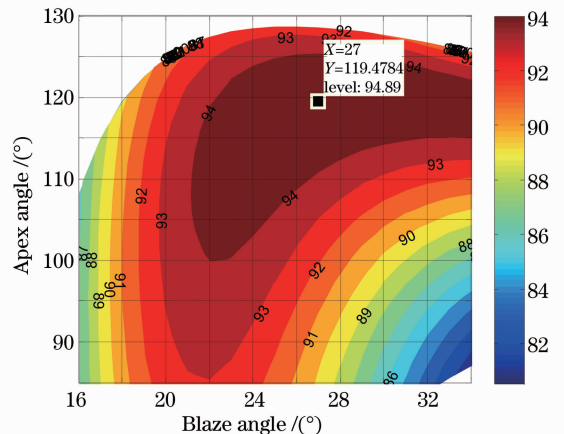


图 4 光栅衍射效率等高线图

Fig. 4 Contour of diffraction efficiency of grating

闪耀角,常用闪耀光栅和中阶梯光栅变化范围比较小,通常为几度甚至 $1^\circ$ ;对于槽顶角,由于考虑到遮挡效应,常用闪耀光栅一般是 $90^\circ$ 左右,中阶梯光栅为锐角,锐角的衍射效率要高于直角和钝角。

以此区域作为光栅闪耀角和槽顶角的优化结果,从而作为指导工艺试验的光栅参数。

本文研究的光通信光栅使用波段为C波段,对应的光谱波段为 $1.52\sim 1.59\ \mu\text{m}$ ,下面将互易定理优化法与传统法计算结果进行比较,如图5所示,曲线1为互易定理优化法计算结果,在整个波段范围内衍射效率基本都大于 $94\%$ ,峰值效率 $95.1\%$ ;曲线2为传统设计方法计算结果,衍射效率从 $89.3\%$ 上升到 $93\%$ ,从设计结果可以看出互易定理优化法要好于传统设计法。

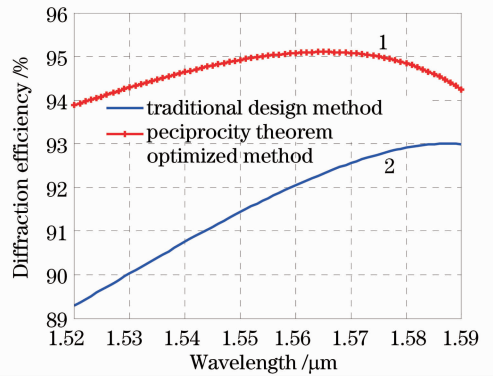


图5 传统设计法与互易定理优化法计算结果比较  
Fig. 5 Comparison of results between traditional design method and reciprocity theorem optimized method

### 3 实验与结果

光栅刻划是由光栅刻划机在镀有铝膜的玻璃、紫铜、无氧铜或不锈钢等基底上刻划出来的,是金刚石刻刀对铝膜挤压、抛光的过程,在该过程中并不产生切屑,而是使铝膜表面按照设计要求发生适当形变。由于这种形变是以塑性形变为主,并伴有非线性弹性形变的耦合形变,其形变机制较为复杂。

按照互易定理优化法计算得到的光栅闪耀角和槽顶角,在光栅刻划机上进行光栅刻划,将得到的光栅用原子力显微镜对其槽形进行测试,测试结果剖面图如图6所示,下方椭圆区域为光栅闪耀角和右底角平均测试结果,分别为 $24.193^\circ$ 和 $40.398^\circ$ ,由此计算得到光栅槽顶角为 $115.409^\circ$ ,使用扫描软件扫描测试得到的光栅槽形,用此槽形计算得到光栅 $1.55\ \mu\text{m}$ 处TM偏振波-1级衍射效率为 $94.6\%$ 。

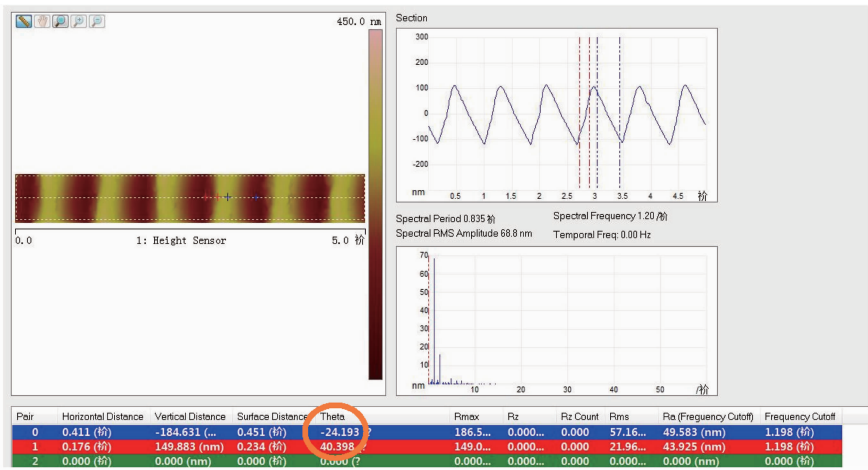


图6 光栅槽形原子力显微镜测试结果

Fig. 6 Testing results of atomic force microscope for grating grooves

使用自制衍射效率测试装置对光栅进行测试,如图7所示,激光器输出波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 的TM偏振波,测试时首先直接测量激光器的输出功率,然后测量光栅在 $76^\circ$ 入射角下-1级衍射光的功率,后者比前者得到光栅衍射效率,经多次测量平均衍射效率为 $92.1\%$ ,比计算值低了 $2.5\%$ ,其原因主要有两点:

- 1) 理论计算的光栅槽形表面为理想的光滑表面,而实际刻划光栅槽形的表面具有一定的粗糙度,这对衍射光会造成一度程度的漫反射,-1级衍射光能量得到损失,一定程度地降低了衍射效率;
- 2) 理论计算时,铝的复折射率引自文献[15],而实际蒸镀铝的复折射率与该参考值有差异,这也会使衍射效率产生偏差。

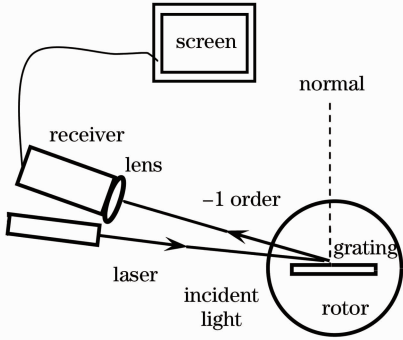


图7 光栅衍射效率测量示意图

Fig.7 Schematic of testing diffraction efficiency of grating

## 4 结 论

为提高光通信光栅衍射效率,降低制作难度,本文提出了互易定理优化法,即将互易定理结果作为初始值,结合衍射效率等高线图对光栅槽形进行优化设计,对于近掠入射光栅得到如下结论:1)互易定理优化法较传统设计方法,光栅衍射效率更高;2)闪耀角和槽顶角的取值范围较大( $10^\circ$ 以上),工艺上更易于制作;3)光栅槽顶角应为钝角,此时衍射效率高于直角和锐角。

## 参 考 文 献

- 1 R. Ramaswami, K. N. Sivarajan. Optical Networks: A Practical Perspective [M]. California: Mogan Kaufmann Publishers, 1998
- 2 G. Vannucci. Combining frequency-division and code-division multiplexing in a high-capacity optical network [J]. *IEEE Network*, 1989, **3**(2): 21~30
- 3 Qiao Guihong. Optical Fiber Telecommunication [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2009
- 4 J. P. Laude. DWDM Fundamentals, Components, and Applications [M]. Boston: Artech House, 2002

- 5 E. Popov, J. Hoose, B. Frankel *et al.*. Low polarisation dependent diffraction grating for wavelength demultiplexing [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(2): 269~274
- 6 K. Aoyama, J. Minowa. Low loss optical demultiplexer for WDM systems in the  $0.8 \mu\text{m}$  wavelength region [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(16): 2854~2836
- 7 Zhongyan Sheng, Lifang Lou, Sailing He. Design and simulation of a planar demultiplexer for coarse WDM [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **225**(1-3): 95~100
- 8 Sheng Zhongyan, Lou Lifang, He Sailing *et al.*. Simulation for an etched diffraction grating (EDG) of wide angle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 546~549
- 9 姜丽芳, 盛钟延, 何赛灵等. 大角度蚀刻衍射光栅(EDG)的模拟 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(5): 546~549
- 9 Sheng Zhongyan, Lou Lifang, He Sailing. Design of an etched diffraction grating with flat-field input/output [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1306~1310
- 10 姜钟延, 姜丽芳, 何赛灵. 平场输入/输出蚀刻衍射光栅的设计 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1306~1310
- 10 Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3133~3139
- 樊叔维, 周庆华, 李红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3133~3139
- 11 Darrin Milner, Kevin Didona, David Bannon. High efficiency diffraction grating technologies LPDL 900 and LPDL 1100 in telecommunications applications [C]. *SPIE*, 2005, **5723**: 34~42
- 12 Zhang Shanwen, Ying Jianxin, Zhang Fangcheng *et al.*. The application of efficiency contour method in  $\text{CO}_2$  laser resonator gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(12): 210~213
- 张善文, 营建新, 张方程等. 衍射效率等高线法在  $\text{CO}_2$  激光器调谐光栅设计中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(12): 210~213
- 13 Zhu Shaoji, Zou Haixing, Bao Xuecheng *et al.*. Diffraction Gratings[M]. Beijing: China Machine Press, 1986
- 祝绍箕, 邹海兴, 包学诚等. 衍射光栅[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 14 R. Petit. Electromagnetic Theory of Gratings[M]. New York: Springer-Verlag, 1980
- 15 E. D. Palik. Handbook of Optical Constants in Solids [M]. Academic Press, 1995

栏目编辑: 李文喆