

## 基于光栅侧面耦合的宽光带集光技术

卢鹭云,汪凯巍,白 剑

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

**摘要:** 利用光栅侧面耦合技术多为单波长或窄带光耦合,用于光纤激光器泵浦、光波导集成等领域,而用于可见光宽带耦合的研究很少。通过在波导上集成亚波长衍射光栅结构,可以引导太阳光在波导的侧面进行出光汇集,作为一种新型的太阳能集光器结构。利用时域有限差分算法软件(FDTD)对光栅结构进行仿真,以获得最大衍射效率的光栅结构参数,并对不同入射角度下的衍射耦合效率进行了分析。结果显示,在宽波段的光谱范围内,以上光栅结构均达到较好的衍射效率,其中闪耀光栅衍射效率最大,其衍射效率可达 48.8%。这种利用亚波长衍射光栅结构的小型集光器有望应用在有关太阳能能量的收集应用中,例如照明、太阳能电池等。

**关键词:** 可见光; 衍射光栅; 侧面耦合技术; FDTD; 太阳能集光器

**中图分类号:** O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3621-06

## Broadband optical concentration technology based on grating side-coupling

Lu Luyun, Wang Kaiwei, Bai Jian

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The technology of grating side-coupling is often applied in such fields as coupling of light of single wavelength or narrow waveband, pump of fiber laser, integration of optical waveguide, but its application for broadband coupling of visible spectrum is rarely studied. Sunlight can concentrate and output at the edge of waveguides by integrating sub-wavelength gratings with waveguides, making it a novel solar concentrator. In this paper, different grating structures with the Finite Difference Time Domain (FDTD) solution software were simulated to obtain the optimal structure design. Besides, the angle of light for the coupling-efficiency was also discussed. The result demonstrates that the structures mentioned above all feature good diffractive efficiencies in broadband wavelength, among which the blazing grating reaches the largest efficiency, namely 48.8%. This kind of sub-wavelength gratings feature integration of small size, which makes it promising in absorption of solar energy, such as lumination, photovoltaic cell, etc.

**Key words:** visible light; diffraction gratings; side coupling technique; FDTD;  
solar concentration

收稿日期:2015-04-09; 修订日期:2015-05-11

基金项目:国家自然科学基金(61007001)

作者简介:卢鹭云(1990-),女,硕士生,主要从事微光学方面的研究。Email: luluyun116@163.com

导师简介:白剑(1967-),男,教授,博士,主要从事二元光学、微光学、光电检测和全景成像等方面的研究。Email: bai@zju.edu.cn

## 0 引言

近年来,随着能源紧缺和环境污染的日益严重,太阳能越来越受到关注。现有许多装置可用于收集太阳能,其中绝大部分的集光器是由菲涅耳透镜和反射镜组成,其所占空间大,结构复杂<sup>[1]</sup>。另一种研究较多的是荧光集光器,通常吸收光能量再发射一个较大波长的光(红移),该波长在基板内通过全反射被引导到边缘收集。但光在通过导光基板的上下界面时被染料分子再吸收的能量损耗大<sup>[2-3]</sup>。

利用衍射光栅的性质以及侧面耦合技术来收集太阳能<sup>[4-6]</sup>,特别是可见光范围,提供了一种新的方法。尽管光栅侧面耦合技术多被用于光纤激光器泵浦、光波导集成等领域中的单波长或窄带光耦合<sup>[7-8]</sup>,但对宽光谱范围的耦合研究甚少。厦门大学刘国华等人<sup>[4]</sup>以波长为 420 nm 的光为例,其最大衍射耦合效率为近 15%。Bala Pesala<sup>[5]</sup>利用光栅折射率为 3,基底折射率为 1.5 的高对比度光栅(HCG)获得很高的衍射耦合效率(>50%),但忽略了光栅材料对可见光的吸收。文中针对可见光的耦合进行研究,利用时域有限差分软件(FDTD)对不同的光栅结构进行优化设计,并对耦合光在波导内传播方面进行分析。这种利用光栅侧面耦合的集光器可广泛用于光伏系统、室内照明,也可以用于太空冶炼等领域<sup>[11-21]</sup>。

## 1 原理

通过在平面波导或光纤上集成亚波长光栅结构,利用衍射光栅高衍射效率的性质可以引导太阳光在侧面进行出光汇集。正入射的可见光通过衍射光栅发生透射衍射,具有大衍射角的 $\pm 1$ 级衍射光可进入到波导或光纤内并通过全反射传播,从而在波导或光纤的边缘处实现聚光。

假设耦合光从折射率为  $n_0$  的空气中入射到折射率为  $n$  的波导介质内,垂直入射的情况下,传播方向不会发生变化,图 1 所示。

光入射到光栅上时出现衍射现象,各级次衍射光符合如下规律:

$$n d \sin \theta = m \lambda_0 \quad (1)$$

式中: $d$  为光栅周期; $\theta$  为衍射角度; $m$  为衍射级次; $\lambda_0$  为光在空气中的波长, $n$  为折射率。

为保证光在波导中能够不断传播,则光传播须满足全反射条件:

$$\theta \geq \arcsin(n_0/n) \quad (2)$$

结合公式(1)与公式(2)可得:

$$d \leq m \lambda_0 \quad (3)$$

显然,零级光无法满足上述条件。根据亚波长光栅结构性性质,只有  $m=1$  满足条件。又  $\sin \theta \leq 1$ ,可知当光栅周期一定时,能耦合的光谱范围为:

$$d \leq \lambda_0 \leq n \cdot d \quad (4)$$

即,能够耦合进入波导的光波长有上限。若以真空中的波长来表示,其上限值为光栅周期与波导介质折射率的乘积。

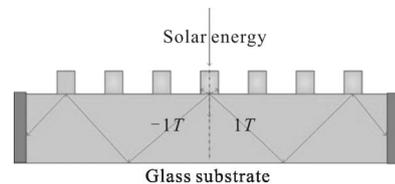


图 1 光栅侧面耦合结构原理图

Fig.1 Principle of grating side-coupling

## 2 光栅模型及优化仿真

若使集光效率达到最大,则要求能耦合进入波导的光能量达到最大。文中利用严格的矢量分析软件 FDTD 对不同类型不同面形的衍射光栅进行结构优化。通过优化光栅的周期、高度、占空比等参数来抑制 0 级光,增强 $\pm 1$ 级透射衍射光,从而在波导侧面处收集更多的能量。

由太阳光谱的组成可知,波长 400~780 nm 的可见光成分占了太阳辐射的绝大部分,峰值波长为 500 nm,因此文中所耦合的入射光光谱范围为 400~660 nm。而几种不同光栅结构的基底材料均为  $\text{SiO}_2$ ,其对于可见光范围的折射率为 1.46。

### 2.1 金属光栅

利用高对比度光栅(HCG)可获得很高的衍射耦合效率<sup>[5]</sup>,因此首先选用的结构模型就是 HCG,其光栅材料为铬,如图 2 所示。

由基本原理可知不同周期下的耦合光谱范围。该次优化主要是对光栅结构中高、占空比以及周期进行优化仿真。

金属光栅仿真优化的最佳结果如图 3 所示,同

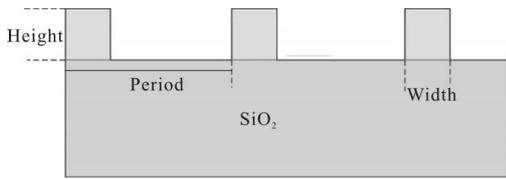


图 2 金属光栅模型

Fig.2 Model of metal rectangular grating

一周期下其衍射效率有多个极值点, 其最佳光栅结构下的 $\pm 1$ 级衍射效率为 19.7%, 位于光栅周期为 440 nm, 金属高为 80 nm, 占空比为 0.4 处。图 4 为最

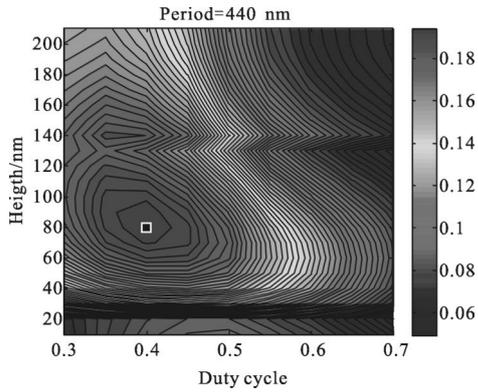


图 3 金属光栅衍射效率等高线图

Fig.3 Contour plot of diffraction efficiency of incoming light in metal grating

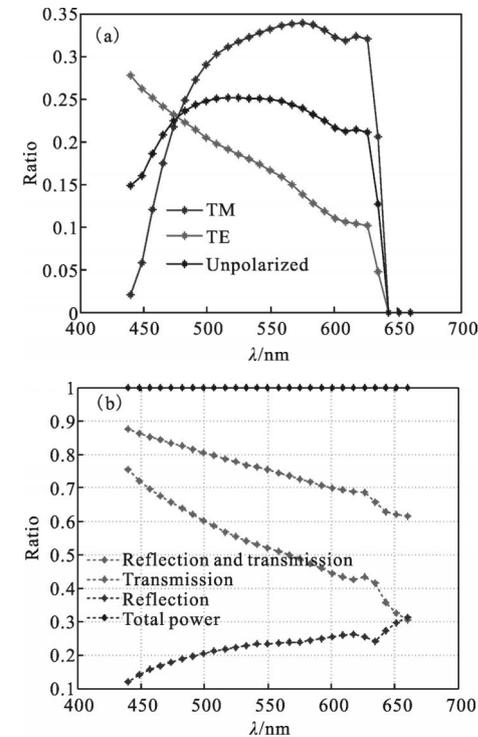


图 4 不同波长下的衍射效率及光强分布

Fig.4 Efficiency ratio and intensity distribution varies with different incident wavelengths

佳结构下得到的不同波长下的 $\pm 1$ 级衍射效率以及其反射光强、透射光强占总光强的百分比。图 4(a)中,不同偏振光的衍射耦合效率不同,各波长的平均衍射效率均不超过 25%;当波长大于 642 nm 时,其耦合衍射效率为 0, 其原因是这些波长下的衍射角大于  $90^\circ$  而不能耦合,与之前的理论分析一致。图 4(b)表示归一化后,各波长下的反射光强,透射光强以及两者之和占总光强的百分比。其中由于金属铬对可见光的吸收,透射光强与反射光强之和不等于总光强。

### 2.2 相位光栅

在可见光范围内,由于金属吸收作用较强且其反射光强较大,因此利用相位光栅代替金属光栅来分析讨论。

对于相位光栅,文中主要讨论两种结构——矩形光栅以及斜梯型光栅,其模型的结构如图 5 所示<sup>[9]</sup>。

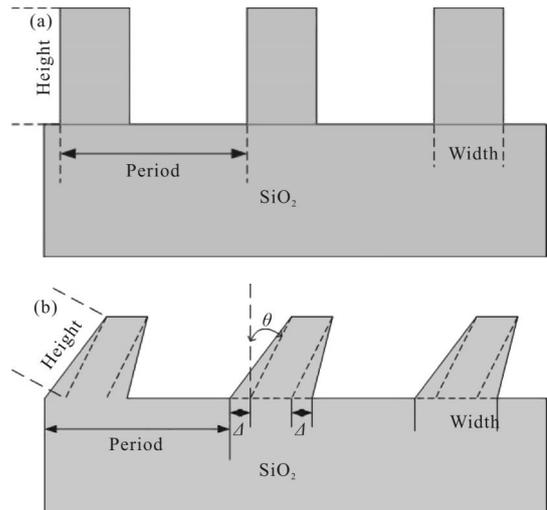


图 5 两种相位光栅模型

Fig.5 Two types of phase grating

#### 2.2.1 矩形相位光栅

利用矩形相位光栅(见图 5(a))来耦合单波长,其衍射效率可以达到极高<sup>[9]</sup>。因此通过 FDTD 软件对光栅周期(400~440 nm)、高以及占空比进行优化,其结果如图 6 所示。结果表明,当周期为 400 nm,高为 230 nm,占空比为 0.48,可获得最大的衍射耦合效率为 16.5%。

图 7 为最佳结构下,不同波长的衍射耦合效率以及归一化的透射光强和反射光强。图 7(a)中,波长 410 nm 处为衍射效率峰值,近 48%,当为 TE 模式时,可获得极高的衍射效率,约 75%。图 7(b)中显示各波长下的反射光强小,且与透射光强之和近似于

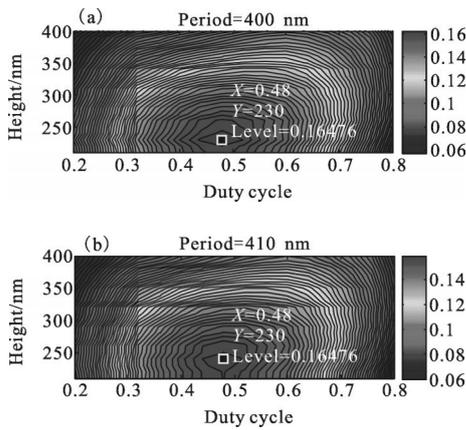


图 6 矩形相位光栅衍射效率等高线图

Fig.6 Contour plot of diffraction efficiency of incoming light in rectangular phase grating

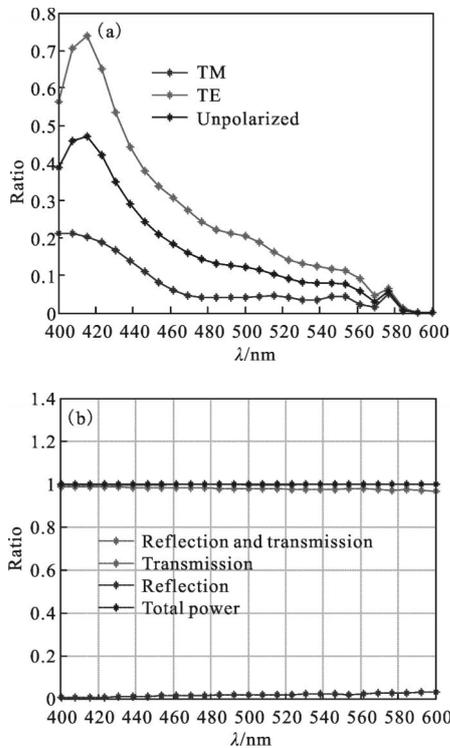


图 7 不同波长下的衍射效率及光强分布

Fig.7 Efficiency ratio and intensity distribution varies with different incident wavelengths

总光强, 表明了 SiO<sub>2</sub> 对可见光吸收极弱, 有利于光的传播。

### 2.2.2 闪耀光栅

闪耀光栅具有将大部分能量集中在一级光上的特点, 其结构模型首次用于耦合宽波段, 如图 5(b) 所示, 由于涉及优化参数多, 文中设定光栅周期为 400nm, 斜梯形上下底之差(2Δ)为 60 nm; 通过仿真优化倾斜

角  $\theta$ , 斜高以及下底, 获得最大的仿真衍射效率如图 8 所示。

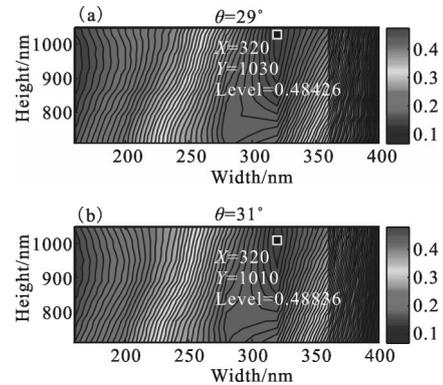


图 8 矩形相位光栅衍射效率等高线图

Fig.8 Contour plot of diffraction efficiency of incoming light in rectangular phase grating

结果表明, 在 400~600 nm 波长范围内, 当光栅的倾斜角  $\theta$  为 31°, 宽为 320 nm, 斜高为 1 010 nm 时, 周期为 400 nm 的闪耀光栅能耦合的  $\pm 1$  级衍射效率达到最大, 为 48.8%; 衍射耦合效率对各参数的微小变化不敏感。图 9 为该结构下不同波长的衍射耦合效率。无偏振时, 较宽光谱范围入射光的衍射耦合效率均高于 60%; 对于 TE 波, 在 460~490 nm 处其衍射效率接近 100%。

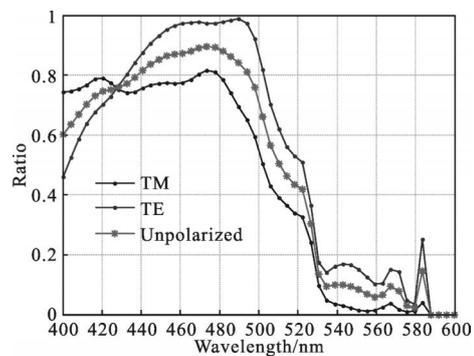


图 9 不同波长下的衍射效率

Fig.9 Efficiency ratio varies with different incident wavelengths

对于反射光强、透射光强所占的比例与图 7 基本一致。图 10 为斜梯型的最佳结构下, 衍射级次为  $\pm 1T$  与  $0T$  的衍射效率之比。当波长为 480 nm 时,  $\pm 1T$  衍射效率最高可达  $0T$  的 12 倍, 为衍射耦合效率的峰值; 但 430~600 nm 之间的衍射效率之比接近于 0, 这也表明相位光栅中, 光衍射耦合中其能量损失最大的在于透射零级光。

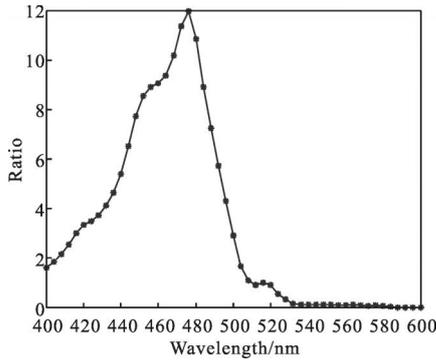


图 10 闪耀光栅各波长下的衍射耦合效率及±1T 光强与 0T 级之比  
Fig.10 Efficiency ratio and the intensity ratio between ±1T and 0T of the optimized blazed grating varies with different incident wavelengths

### 3 不同入射角的衍射耦合效率

对于太阳能集光器,其入射光的角度每时每刻都在变化。因此,须考虑不同入射角对光栅集光器衍射耦合效率的影响。利用 FDTD 对最佳结构的斜梯型相位光栅进行仿真计算,结果如图 11 所示。入射波长分别为 500 nm、550 nm 以及 600 nm 时,入射角为 0°~30°的耦合衍射效率变化曲线如图 11(a)所示。当入射角略增大时,对于波长为 500 nm 的光,其耦

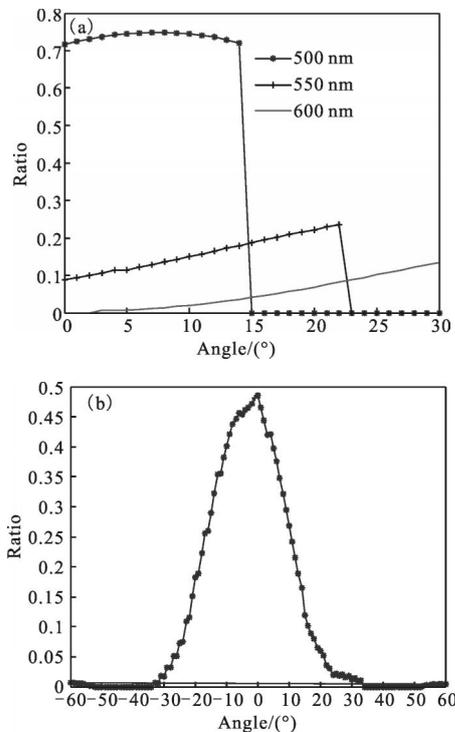


图 11 不同入射角下的衍射耦合效率

Fig.11 Diffraction efficiency of incoming light in blazed grating varies with different angle of incidence

合衍射也略增大,但当入射角为 15°时便不能耦合进入波导;对于 600 nm,正入射时不能耦合进入波导的光随着入射角度的增大,其衍射耦合效率也随之增大。图 11(b)为 400~600 nm 的光谱范围内总衍射耦合效率随入射角的变化曲线。结果显示,其最大的总衍射耦合效率位于入射角 0°,即入射光为正入射;随着入射角的逐渐增大,衍射耦合效率下降较为迅速,当入射角为 20°时,衍射耦合效率小于 1%。这是由于随着入射角增大,短波长耦合消失的能量比长波长耦合进入波导的能量多。

### 4 结论

通过不同类型不同面型的光栅结构比较,利用斜梯型相位光栅耦合可见光可获得较高的衍射耦合效率,为 48.8%;由于 0 级衍射光所占比例较高,可通过波导底面镀反射膜而将部分能量留在波导内。在这种结构下,入射光以小角度入射可获得较好的衍射耦合效率,但较大入射角时其效率就比较低。

在光传播过程中,耦合光经过全反射传播到光栅处会发生衍射泄漏。小型光栅集光器由于衍射泄露次数较少,相比昂贵复杂的集光器,可广泛使用。

### 参考文献:

- [1] Swanson Richard M. Photovoltaic concentrators[Z]. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2003, 11: 449 - 503.
- [2] Goetzberger A, Greube W. Solar energy conversion with fluorescent collectors[J]. *Applied Physics*, 1977, 14(2): 123-139.
- [3] Rau Uwe, Florian Einsele, Gerda C Glaeser. Efficiency limits of photovoltaic fluorescent collectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(17): 171101.
- [4] Liu Guohua, Ren Xuechang. A new solar concentrator based on one-dimensional grating[C]//Photronics and Optoelectronic (SOPO), 2010: 1317-1331.
- [5] Pesala Bala. High-contrast grating based planar light concentrators[C]//SPIE, 2012: 3013-3020.
- [6] De Jong, Ties M, Dick Boer, et al. Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators [J]. *Optics Express*, 2011, 19(16): 15127-15142.
- [7] Wang Fengrui, Li Mingzhong, Chen Jixin, et al. New research progress of pumping methods for double-clad fiber

- lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(10): 26–28. (in Chinese)
- 王凤蕊, 李明中, 陈吉欣, 等. 双包层光纤激光器的抽运技术研究新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(10): 26–28.
- [8] Bai Benfeng. Optimization of nonbinary slanted surface-relief gratings as high-efficiency broadband couplers for light guides[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(28): 5454–5464.
- [9] Gerritsen Hendrik J, Mary Lou Jepsen. Rectangular surface-relief transmission gratings with a very large first-order diffraction efficiency (~95%) for unpolarized light[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(25): 5823–5829.