

文章编号: 0253-2239(2007)07-1275-4

# 基于达曼光栅的动态光耦合器\*

底彩慧<sup>1,2</sup> 周常河<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 提出了一种基于达曼光栅的动态光耦合器, 通过控制装置中达曼光栅位移参量, 可实现入射光束的分束或合束以及两者之间的动态转换。适当选择达曼光栅类型可实现任意  $N \times M$  的动态光耦合。实验中以 1550 nm 光波长为例, 对  $1 \times 8$  达曼动态光耦合器进行测量, 测得其实实现光开关功能时插入损耗为 0.43 dB, 实现光分束功能时均匀性达到 0.03, 单路插入损耗均值为 10.5 dB。该实验装置易于调节、体积小、能耗低, 且关键元件达曼光栅制作工艺成熟, 易于批量化生产。特别是在实现中大规模光交换阵列时, 该方案就具有更明显的优越性, 有实用意义。

**关键词:** 集成光学; 光耦合器; 达曼光栅; 光分束器; 二元光学

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## Dammann Grating-Based Dynamic Optical Coupler

Di Caihui<sup>1,2</sup> Zhou Changhe<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)  
(<sup>2</sup> Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** A novel dynamic optical coupler is presented by employing a specially designed Dammann grating. By controlling the shift parameter of Dammann grating, this device can easily realize the function of either a beam splitter or a combiner and transformation between both of them. An arbitrary  $N \times M$  dynamic optical coupling can be achieved by choosing an appropriate Dammann grating. In the experiment a high performance  $1 \times 8$  dynamic coupler achieves good uniformity of 0.03, insertion loss of around 10.5 dB for each channel as a splitter and a low insertion loss of 0.43 dB as a switch at the wavelength of 1550 nm. This device has the advantages of easy adjustment, compact size and low loss. Moreover, Dammann grating used in the experiment can be easily mass-fabricated by binary optical technology. In addition, this system is a preferable approach in the integral packaging. This device has the unique diffractive advantages of Dammann-grating-incorporated system for dynamic optical coupling of a large fiber array. Note that this method is generally applicable and should be interesting for practical use.

**Key words:** integrated optics; optical coupler; Dammann grating; optical splitter; binary optics

## 1 引言

随着光纤通信干线网的建立, 光纤到户 (FTTH) 的用户网作为未来光通信网发展方向<sup>[1]</sup>, 对实现一路到多路及多路到一路的动态光耦合技术的需求将与日俱增, 全球市场潜力巨大。光耦合器是新一代全光网络的关键器件<sup>[2]</sup>。其作为分立器件的发展趋势必然是集成化、小型化及动态化。目前光耦合器的研究主要包括微电子机械光开关、热光效应光开关、光波导光开关和电光开关等<sup>[3,4]</sup>。但是

这些耦合技术仍存在一定的不足, 如偏振依赖性、波长依赖性、温度依赖性等。特别是需要实现大规模光交换阵列传输时, 以上技术均会受到不同程度的限制。以光纤耦合器为例, 传统的方法是采用光纤熔融拉锥法, 传输过程中需要复杂的光纤预处理和多个光纤耦合器的串连使用, 这必然会增加偏振损耗, 缩减传输带宽, 导致均匀性下降, 插入损耗增加。

为解决这些问题, Pan 等<sup>[5]</sup>提出了用衍射光学元件实现  $1 \times N$  光纤耦合技术, 将一路输入光分成

作者简介: 底彩慧(1979—), 女, 山西人, 博士研究生, 主要从事光通信器件微集成技术与微光学技术等方面的研究。

E-mail: dicaihui@gmail.com

导师介绍: 周常河(1965—), 男, 浙江人, 研究员, 博士生导师, 主要从事微结构光学与飞秒信息处理技术等方面的研究。

E-mail: chazhou@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2006-06-16; 收到修改稿日期: 2006-12-15

多路并行阵列输出。与传统光学方法相比,衍射光学元件作为光纤耦合器中的新型元件具有简单结构、优性能且易于大批量复制生产等优点。但此装置只能用作光分束器,不能实现动态耦合功能。达曼分束器具有优均匀性、低损耗、结构紧凑等优良性能。为实现动态耦合功能,赵欣等<sup>[6]</sup>提出一种基于互补偶数型达曼光栅的 $1 \times N$ 动态耦合器,通过两互补偶数型达曼光栅之间半周期的相对位移可实现分束功能与合束功能之间的转换。但是此耦合器需要严格控制两达曼光栅之间的相对位移,否则光栅对准误差产生的零级串扰将严重影响输出光纤阵列的效率和均匀性<sup>[7]</sup>。

本文提出了一种基于达曼光栅的动态光耦合器,其中达曼光栅表面分为光栅分布区和空白区。通过调节达曼光栅位移参量,改变光栅与入射光束的相对位置,很容易就实现光分束器与光合束器之间的动态转换功能。选择适当的达曼光栅类型可实现任意 $N \times M$ 的动态耦合。

## 2 达曼光栅及其特性分析

达曼光栅是一种可以将入射单色光在傅里叶变换的远场处高效率地生成均匀光强点阵的相位光栅。

最初在 20 世纪 70 年代,Dammann 等<sup>[8]</sup>在研究多个像复制时提出达曼光栅。他首次把大规模集成电路工艺引进光学领域,为微光学的发展奠定了基础。从 80 年代末至今,由于光计算与光互连的迅速发展,达曼光栅受到了普遍的重视,现已成功设计并制作出了 $64 \times 64$ 点阵达曼光栅以及圆环形达曼光栅<sup>[9,10]</sup>。

达曼光栅是一种具有特殊孔径函数的相位型光栅,相位结构呈周期性分布,且每个周期内的相位都是二值的,即 $(0, \pi)$ 。光栅及其谱完全由光栅结构中若干组相位转换点坐标决定。

偶数型达曼光栅具有半周期相位反转特性<sup>[11]</sup>,排除了零级衍射光对制作误差的敏感性,使实际制作的偶数点阵的均匀性容易高于奇数点阵。

## 3 动态光耦合器原理

### 3.1 工作原理

图 1 是 $1 \times 8$ 达曼动态光耦合器结构示意图。装置由光源、输入光纤、位移器、光功率探测器、达曼相位板、输出透镜和输出光纤阵列组成。相位板放在输出透镜的前焦面上,输出光纤阵列放置在输出透镜的后焦面上。

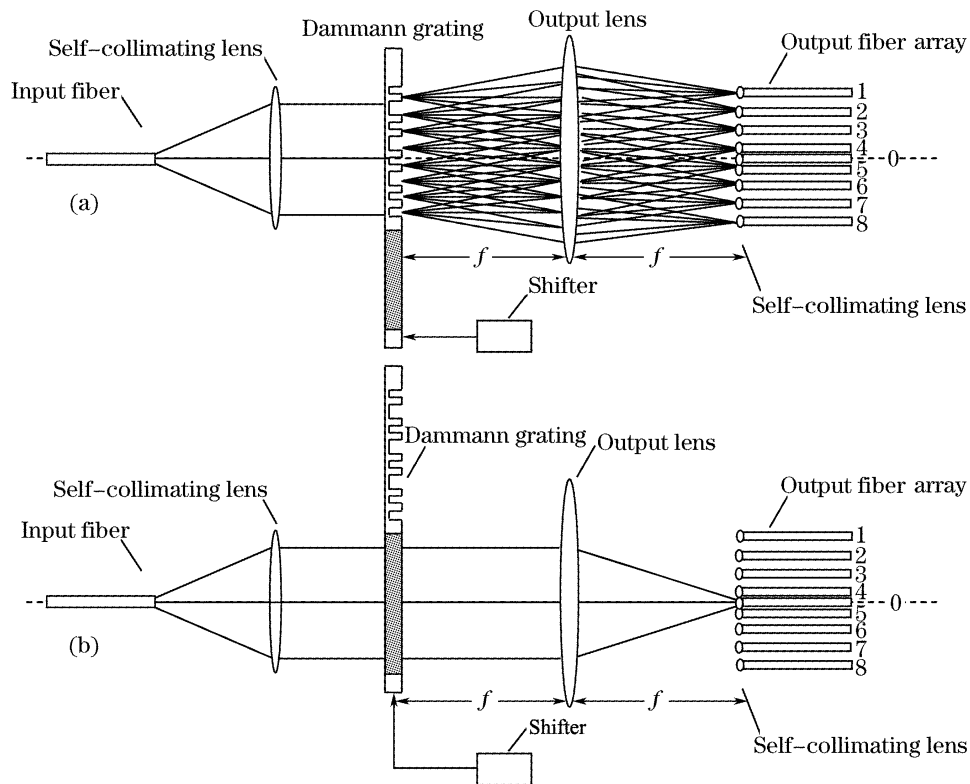


图 1  $1 \times 8$  动态达曼光栅耦合器结构示意图。(a) 入射光作用于光栅区实现分束功能,(b) 入射光作用于空白区实现光开关功能

Fig. 1 Schematic structure of the  $1 \times 8$  dynamic Damann grating coupler. (a) When incoming light entirely impinges on the Damann-grating-distributing area, it works as a splitter. (b) when incoming light entirely impinges on the blank area, it functions as a switch

位移器控制相位板相对入射光束位置移动。输入输出光纤端口均加有自准直透镜,可对光纤内的传输光束进行准直和扩束,以确保耦合器有很高的衍射效率和优良的均匀性。当入射光束经过准直后完全照射在相位板的达曼光栅分布区时,就会被均匀地分成多束等光强光束,再由会聚透镜会聚耦合到输出光纤阵列中,从而实现分束功能。当入射光束经过准直后完全作用在空白区时,由于没有相位变化,光束无偏转地被透镜会聚到位于焦点处的输出光纤中,从而实现光开关功能。综上所述,选择适当的达曼光栅类型可实现任意  $N \times M$  的光分束或光合束以及两者之间的动态转换。

### 3.2 光耦合器的指标

光耦合器的重要指标有插入损耗、通道均匀性。

#### 1) 插入损耗

插入损耗是评价光耦合器性能优劣的主要指标,用分贝(dB)表示,其数学表达式为

$$D = -10 \lg \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}, \quad (1)$$

其中  $P_{\text{out}}$  和  $P_{\text{in}}$  分别表征某通道输出端口的光功率和输入端口的总功率。

#### 2) 耦合器通道的均匀性

对于要求均匀分光的光耦合器,实际制作时由于工艺的限制,往往不能做到绝对的均分。均匀性就是用来衡量均分器件的“不均匀程度”的参量,其定义为

$$n_{\text{uni}} = \frac{\max(I_n) - \min(I_n)}{\max(I_n) + \min(I_n)}, \quad (2)$$

其中  $\max(I_n)$  和  $\min(I_n)$  分别为各输出端口功率中的最大值和最小值。

## 4 动态光耦合实验

### 4.1 光栅制作

实验中采用的是  $1 \times 8$  偶数型达曼光栅。首先,通过计算机模拟得到  $1 \times 8$  偶数型达曼光栅的数值解<sup>[11]</sup>。设定光栅周期为  $100 \mu\text{m}$ ,则半周期内光栅相位转换点的数值为  $0 \mu\text{m}, 6.185 \mu\text{m}, 17.654 \mu\text{m}, 20.858 \mu\text{m}, 31.797 \mu\text{m}, 50.000 \mu\text{m}$ 。然后,利用电子束制版法制作掩模版,通过接触转印和曝光,将掩模版上的图案转移到玻璃基底的光刻胶上。再利用湿化学刻蚀方法将带有掩模版图案的玻璃基底在腐蚀液中进行刻蚀,通过控制刻蚀时间得到所需相位深度。最后经过处理得到所需相位板。图 2 为采用 Taylor Habson 台阶仪测得光栅表面形貌。文

献[11]具体分析了相关的制作误差。

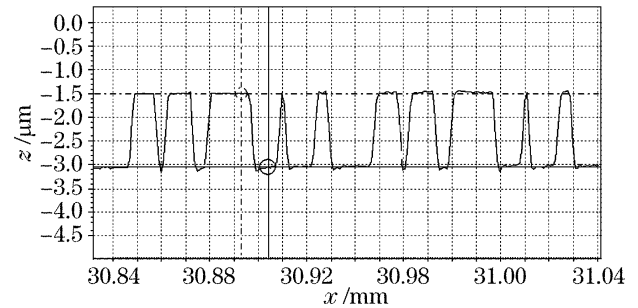


图 2 Taylor Hobson 台阶仪测得的达曼光栅分布区表面形貌图

Fig. 2 Measured surface profile of the Dammann-grating-distributing area by using the Taylor Hobson step height standard equipment

### 4.2 实验结果

实验中采用中心波长  $1550 \text{ nm}$  的单模调制单色光源。位移器则采用 NI 公司出产的由步进电机控制的微动平移台。此平移台可提供连续位移。输出透镜为焦长  $3.0 \text{ cm}$  的会聚透镜。输入输出光纤均采用与  $1550 \text{ nm}$  光源匹配的自准直单模光纤,光纤数分别为 1 根与 9 根。实验中需要注意的是输出光纤阵列的中心光纤位于会聚透镜的焦点处。

图 3 是用红外 CCD 在输出透镜后焦面接收到的输出光点。图 3(a)是实现光开关功能时的出射光点,中心光点的插入损耗约为  $0.43 \text{ dB}$ 。图 3(b)是实现分束功能时的衍射光点。实验中通道 1~8 依次对应图 3(b)中  $-7, -5, -3, -1, +1, +3, +5, +7$  等衍射级次,输出阵列的中心光纤通道 0 对应图 3 中的 0 级。

图 3 中偶数级次光点的产生和图 3(b)中零级光谱强度的增加是由湿化学法工艺缺陷所造成的。湿化学法刻蚀虽然工艺简单、成本低廉,但其刻蚀深度难以精确控制,存在一定的侧蚀误差和刻蚀深度

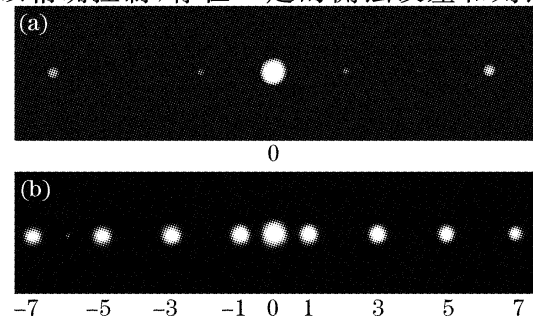


图 3 红外 CCD 测得输出光点。(a)耦合器作为光开关时,(b)耦合器作为光分束器时

Fig. 3 Output light spot(s) taken with an infrared CCD camera. (a) When the coupler works as a switch, (b) when the coupler works as a splitter

误差<sup>[11]</sup>。通过改进工艺,可以制作出性能更加优良的达曼光栅,以降低上述实验误差。

从图4可以看出 $1 \times 8$ 达曼分束器取得了很好的均匀度,均匀度达到0.03,这个值略大于优化理论值和理想值。各通道输出端平均插入损耗值为10.7 dB,与文献[5]中报道的实验值相当接近。由于本装置采用了可以获得很高衍射效率的偶数型达曼光栅、多路光纤阵列的自准直透镜和可提供精确位移的移动平台,测得通道间串扰特性非常稳定,有较高的衍射效率。实验中存在一定的光栅制作误差和光纤阵列对准误差,测得的平均插入损耗值10.5 dB与优化理论值10.2 dB有0.3 dB的差别,这完全可以通过提高制作工艺和对准精度来避免的。

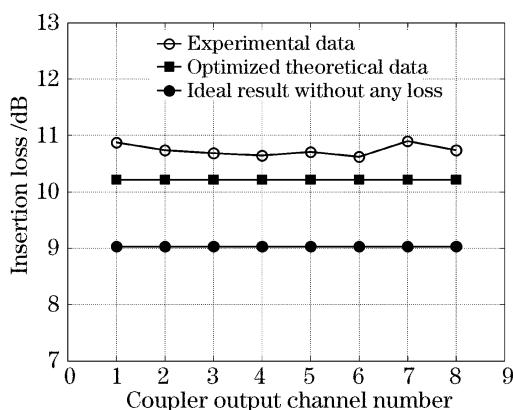


图4  $1 \times 8$ 耦合器各通道的插入损耗分布图

Fig. 4 Measured insertion loss of eight output channels

本文提出的达曼动态光耦合器的发展方向是模块化和集成化。达曼耦合器的模块化将应用许多重要的技术,如机械滑块定位技术、光电控制技术等。此外,研究和生产达曼动态光耦合器的关键是耦合器元件的设计、加工、封装技术和工艺。通过提高微光学加工工艺,将结构中的达曼光栅、输入输出光纤端口的自准直透镜以及输出透镜加工到更小的尺寸,完成装置的集成化,实现结构紧凑,操作方便,性能稳定可靠等特性。

## 5 结 论

提出了一种基于达曼光栅的动态光耦合器,通过控制达曼光栅的相对位移,耦合器可方便地实现光分束与光合束间的动态转换功能。和文献[7]相比,本方案主要优点是放松了对移动台移动精度的

限制。只要光照到光栅区或空白区,就可以实现同台光耦合的功能。这对实际应用是有益处的。实验中对1550 nm光波长的 $1 \times 8$ 达曼动态光耦合器进行测量,测得其实现光开关时插入损耗为0.43 dB,实现光分束时均匀性为0.03,单路插入损耗为10.5 dB。同传统光纤耦合器件相比,本装置具有易于调节、成本低、损耗小等优点。对于这种耦合器的研制下一步工作是完善工艺中的各个步骤,进一步改善其均匀性,减小损耗。文献[12]中介绍了一种输入光纤光束在自由空间中有效耦合到输出光纤阵列的技术。将此技术加以应用,达曼动态耦合器性能可望达到实用化的要求。

## 参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems* [M]. third edition, New York: John Wiley & Sons Inc., 2002
- 2 J. P. Laude. *DWDM Fundamentals, Components, and Applications* [M]. Boston: Artech House Optoelectronics Library, 2002
- 3 Yan Xiaona, Liu Liren. Theory of anisotropic-diffraction based photorefractive switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1249~1252 (in Chinese)  
阎晓娜,刘立人. 各向异性光折变光开关的原理[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1249~1252
- 4 He Na, Wu Chongqing, Wei Yan *et al.*. Fused planar  $3 \times 3$  single mode fiber coupler[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 323~327 (in Chinese)  
何娜,吴重庆,卫炎等. 熔锥平行排列 $3 \times 3$ 单膜光纤耦合器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 323~327
- 5 J. J. Pan, T. Zhu.  $1 \times N$  fiber coupler employing diffractive optical element[J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(4): 324~325
- 6 Xin Zhao, Changhe Zhou, Liren Liu. Dynamic optical coupling technique based on complementary Dammann gratings[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4788**(28): 231~238
- 7 Caihui Di, Changhe Zhou. Dynamic optical coupled system employing even-numbered Dammann gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(9): 1993~2000
- 8 H. Dammann, E. Klotz. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures[J]. *Opt. Acta*, 1977, **24**(4): 505~515
- 9 Xi Peng, Zhou Changhe, Zhao Shuai *et al.*. Design and fabrication of  $64 \times 64$  spot array Dammann grating[J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **28**STBZ(4): 369~371 (in Chinese)  
席鹏,周常河,赵帅等.  $64 \times 64$ 点阵达曼光栅的设计与实现[J]. *中国激光*, 2001, **28**(4): 369~371
- 10 Changhe Zhou, Jia Jia, Liren Liu. Circular Dammann grating[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2174~2176
- 11 Changhe Zhou, Liren Liu. Numerical study of Dammann array illuminators[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(26): 5961~5969
- 12 Jacques Duparré, Bernt Götz, Rolf Göring. Micro-optical  $1 \times 4$  fiber switch for multimode fibers with  $600\text{-}\mu\text{m}$  core diameters[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(34): 6889~6896