

AWG 工作原理和主要技术指标及设计和优化

北京锦坤科技有限公司 www.jonkon.com.cn

在光纤通信系统中，最早商用的 DWDM 模块是由多个三端口的介质膜滤波器（TFF）串联而成，但是当信道数大于 16 时，基于 TFF 技术的 DWDM 模块因损耗太大，不能满足应用需求。阵列波导光栅（AWG）应运而生，成为 32 通道以上 DWDM 模块的主要技术途径。AWG 是以平面光路（PLC）技术制作的器件，其基本结构如图 1 所示，由输入波导、输入星形耦合器、阵列波导、输出星形耦合器和输出波导阵列五部分组成。输入的 DWDM 信号，由第一个星形耦合器分配到各条阵列波导中，阵列波导的长度依次递增 ΔL ，对通过的光信号产生等光程差，其功能相当于一个光栅，在阵列波导的输出位置发生衍射，不同波长衍射到不同角度，经过第二个星形耦合器，聚焦到不同的输出波导中。

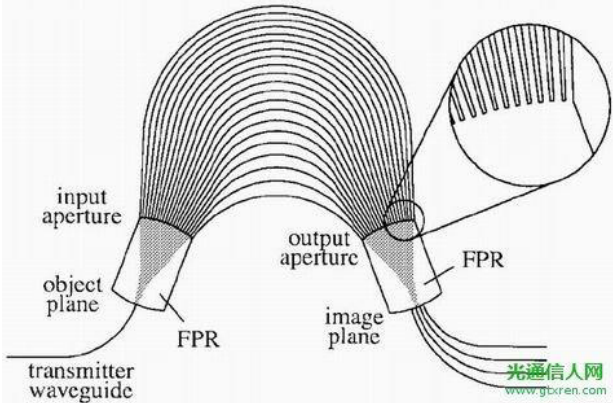


图 1. AWG 基本结构

为了更直观的理解 AWG 的工作原理，我们首先来分析凹面反射式光栅和罗兰圆的结构和原理，如图 2 所示，凹面光栅的曲率半径为 $R=2r$ ，罗兰圆的半径为 r ，二者内切且罗兰圆通过光栅中心。通过简单的光路分析和一定的近似可知，罗兰圆上任一点发出的光，经凹面光栅衍射之后仍聚焦在罗兰圆上，不同衍射级次对应不同衍射角，满足衍射条件：

$$d(\sin \theta + \sin \theta) = m\lambda \tag{1}$$

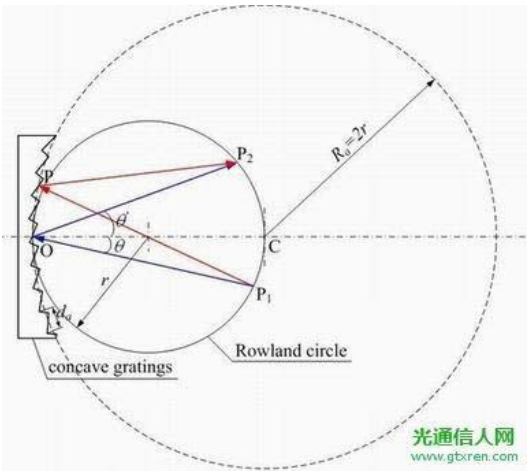


图 2. 凹面反射式光栅和罗兰圆结构

AWG 的输入/输出星形耦合器采用类似凹面反射式光栅和罗兰圆的结构，如图 3 所示，输入/输出波导的端口位于罗兰圆的圆周上，阵列波导位于凹面光栅的圆周上。

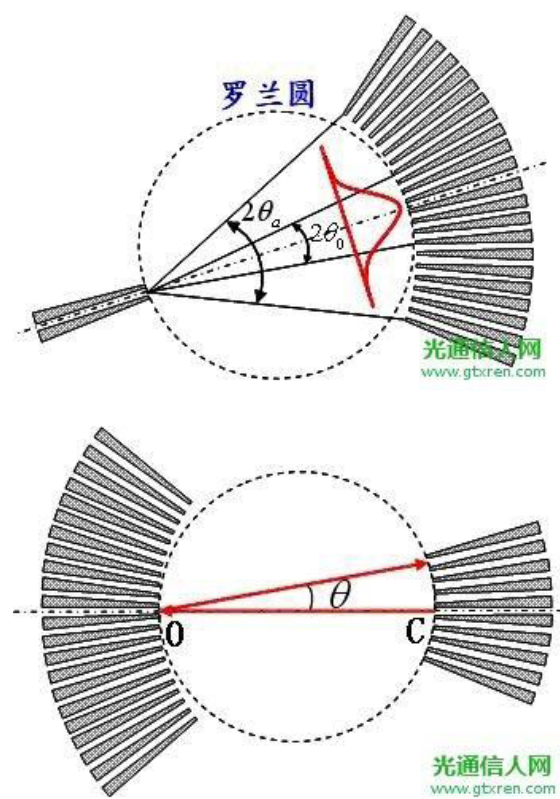


图 3. a)输入星形耦合器，b)输出星形耦合器

输入星形耦合器与输出星形耦合器成镜像关系，输入波导发出的光信号经阵列波导衍射，不同波长聚焦到不同输出波导；图 4 中罗兰圆上 C 点发出的光信号经凹面光栅反射衍射，不同波长聚焦到罗兰圆上的不同点。二者完全等效，差别只在于后者是反射式光栅，而前者是透射式光栅。对于前者，我们也可以理解为图 3 (b) 中波导 C 发出的光信号，经阵列波导反射衍射并聚焦到不同输出波导中。

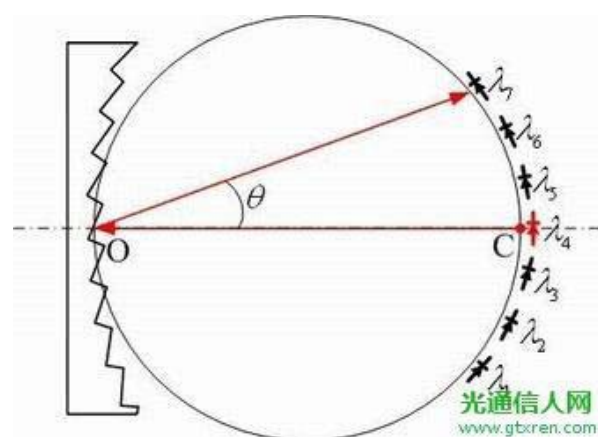


图 4. 凹面反射式光栅中的衍射

AWG 的衍射公式与凹面光栅略有不同：

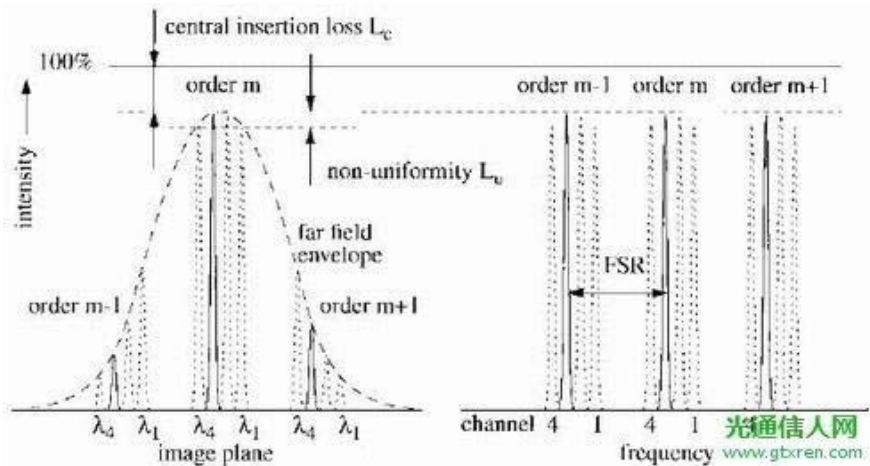
$$n_c d_a \sin \theta = n_a \lambda \sin \phi \quad (2)$$

其中 d_a 为阵列波导中心间距， n_c 为星形耦合器区域的等效折射率， n_a 为阵列波导的等效折射率， m 为衍射级次。从式 (2) 可以看到，AWG 与普通光栅有着相同的衍射能力，可用于 DWDM 信号的复用/解复用。从 (2) 式可以看到，同一波长的不同衍射级次，将衍射为不同角度，聚焦到不同的输出波导中，如图 5 (a) 所示，其中主衍射级次的光功率最强，次级衍射光功率迅速衰减。在满足 (3) 式的情况下，不同波长的主衍射级次将进入相同的输出波导，造成串扰， $\Delta\lambda$ 称为 AWG 的自由光谱范围 (FSR)，如图 5 (b) 所示，为避免串扰，FSR 应大于需要复用/解复用的信号谱宽。

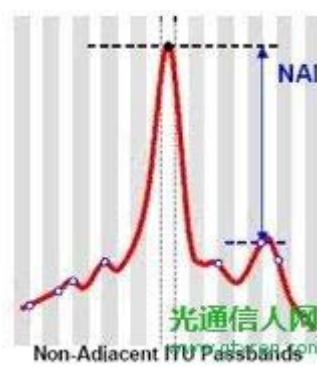
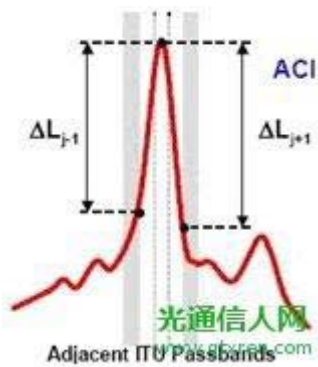
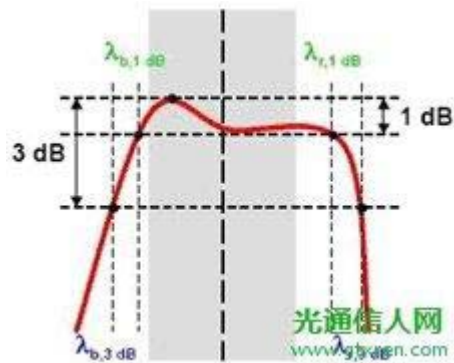
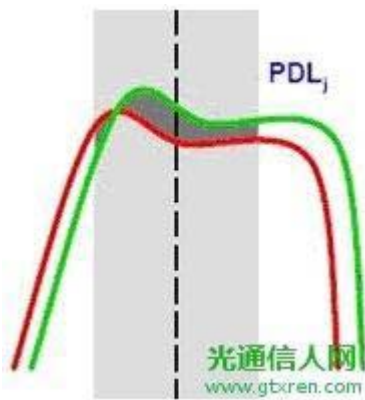
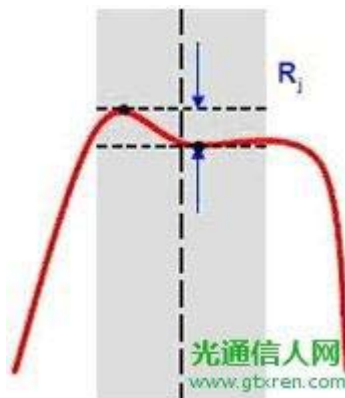
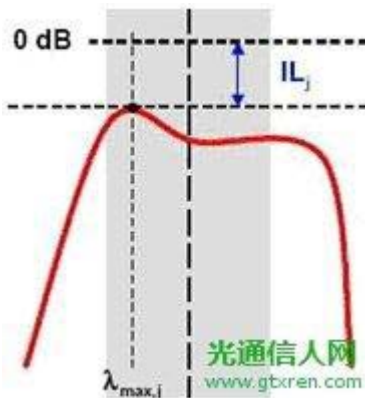
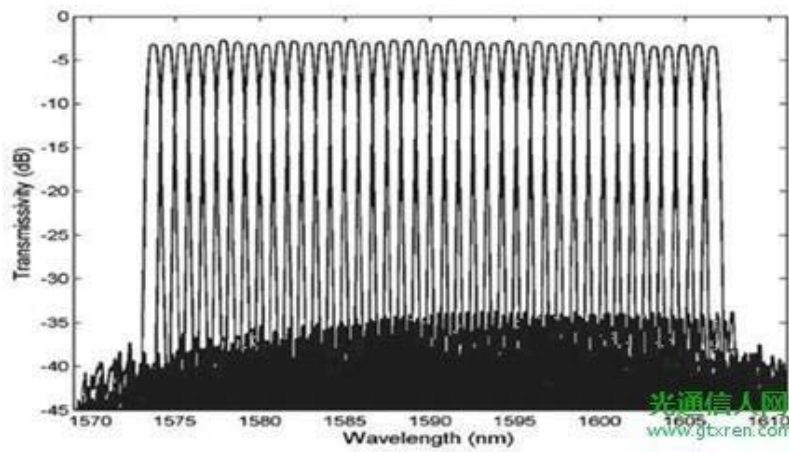
AWG 工作原理和主要技术指标及设计和优化(2)

(3) a)b) 图 5.AWG 的 a)次级衍射和 b)自由光谱范围一个典型的 AWG 传输谱线如图 6 所示，其主要技术指标有插入损耗、损耗均匀性、通带起伏、偏振相关损耗 (PDL)、通带宽度、相邻通道隔离度、非相邻通道隔离度等，分别

$$m\lambda_0(m\pm 1)\lambda_0 \pm \lambda_0 \left| \frac{d}{d\lambda} \right| \Delta\lambda \quad (3)$$



一个典型的 AWG 传输谱线如图 6 所示，其主要技术指标有插入损耗、损耗均匀性、通带起伏、偏振相关损耗 (PDL)、通带宽度、相邻通道隔离度、非相邻通道隔离度等，分别如图 7 (a)、图 5 (a)、图 7 (b-f) 所示。



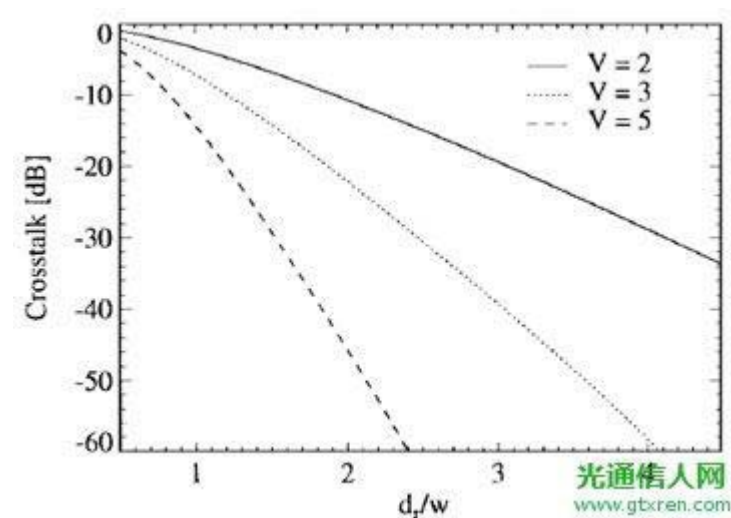
e)相邻通道隔离度 f)非相邻通道隔离度

图 7. AWG 的主要技术指标

一、AWG 的设计步骤

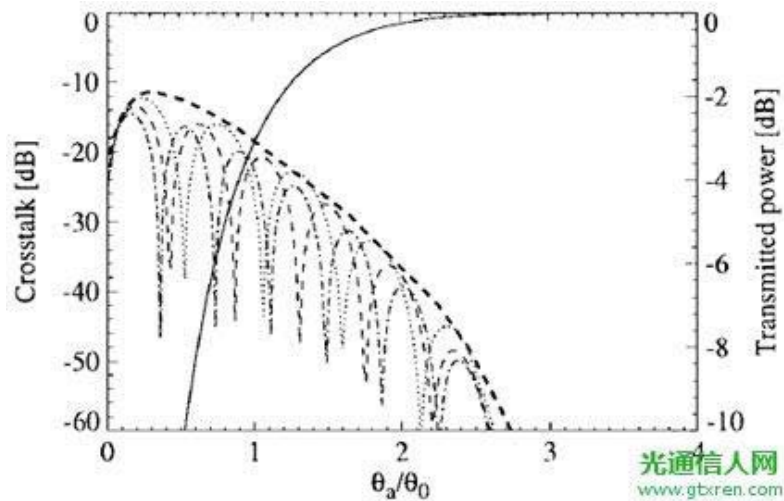
AWG 参数中有多个自由度，因此其设计步骤也有多种，一个典型的设计步骤如下：

- 1) 由设计要求确定信道数 N 和信道间隔 Δf ;
- 2) 确定波导宽度 W 和折射率差 Δ : 要求波导满足单模条件，并考虑波导的最小弯曲半径（这对器件布版非常重要）随 W 和 Δ 单调递减，SiO₂ 波导一般取 $W=6\mu\text{m}$ ， $\Delta=0.75\%$;
- 3) 确定输出波导间距 dr : AWG 的串扰随 dr 的减小而增加，如图 8，根据对串扰的要求确定 dr ;



AWG 工作原理和主要技术指标及设计和优化(3)

- 4) 确定罗兰圆直径 R_a : AWG 的损耗均匀性 $8.7(\max/\theta)^2$ ，而 $R_a=S_{\max}/\max$ ，由边缘通道位置 $S_{\max}$ 和衍射角 $\max$ 决定;
- 5) 确定阵列波导间距 da : da 越小则器件的损耗越小，在阵列波导与星形耦合器相接处，应使波导间隙尽量小，接
- 4) 确定罗兰圆直径 R_a : AWG 的损耗均匀性 $\approx 8.7(\theta_{\max}/\theta_0)^2$ ，而 $R_a=S_{\max}/\theta_{\max}$ ，由边缘通道的位置 $S_{\max}$ 和衍射角 $\theta_{\max}$ 决定;
- 5) 确定阵列波导间距 da : da 越小则器件的损耗越小，在阵列波导与星形耦合器相接处，应使波导间隙尽量小，接近光刻极限;
- 6) 确定阵列波导中相邻波导长度差 ΔL : 阵列波导的色散 $D \propto \Delta L R_a / da$ 且 $D = dr / \Delta f$ ，由此决定 ΔL ;
- 7) 确定阵列波导数 N_a : 边缘阵列波导相对于输入波导的张角 $2\theta_a$ 影响损耗和串扰，如图 9 所示，根据损耗和串扰要求选定 θ_a ，再计算阵列波导数 $N_a = 2\theta_a R_a / da + 1$ 。



8)选择 **AWG** 的布版方式：布版需要考虑输入/输出端口的设置和尽量缩小器件的布版面积，常用的布版方式有两种，如图 10 所示。

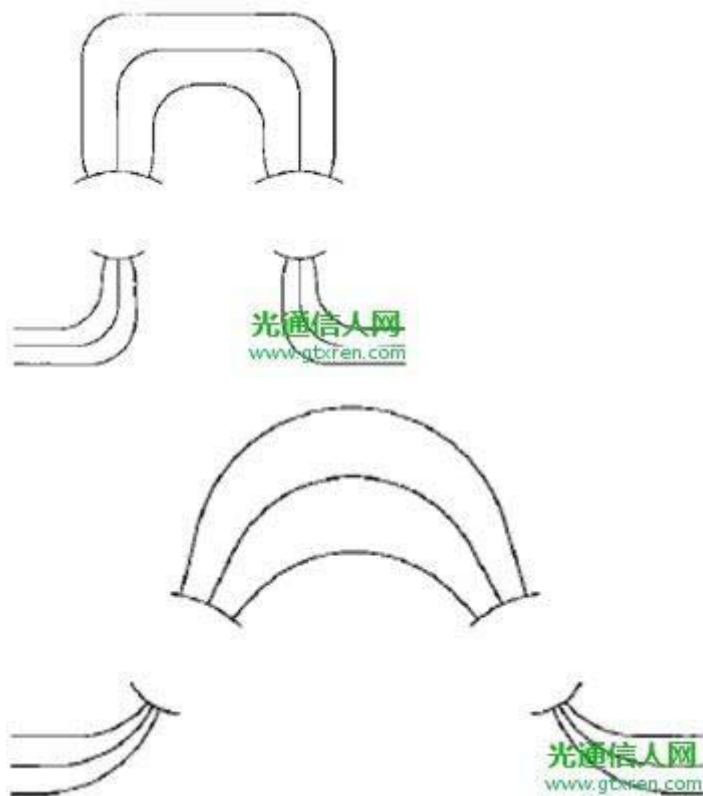
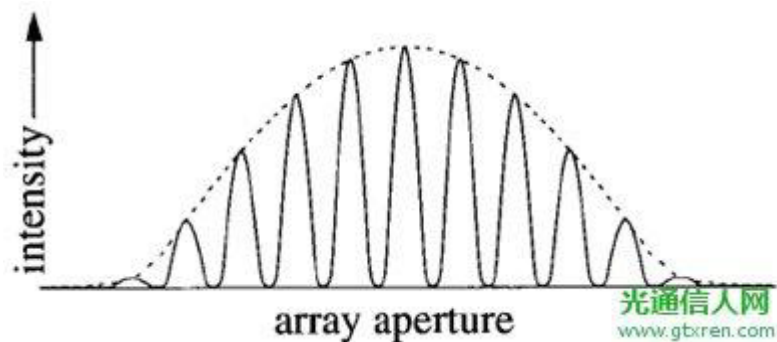


图 10. **AWG** 常用的布版方式

二、减小 **AWG** 损耗的途径

在 **AWG** 的输入星形耦合器中，如图 3（a）和图 11 中虚线所示，输入波导发

出的光场呈高斯分布，分配到各条阵列波导中。如果在阵列波导的输出端能够得到同样的光场分布，就能够无损耗的耦合到目标输出波导中。实际上，由于端口位置波导间隙的影响，在阵列波导输出端得到的光场如图 11 中实线所示，光场被撕裂，因此产生耦合损耗。如果采用强限制波导（折射率差较大）或者波导间隙较大，光场被完全撕裂，损耗较大；如果采用弱限制波导或者波导间隙较小，光场未完全撕裂，损耗较小。

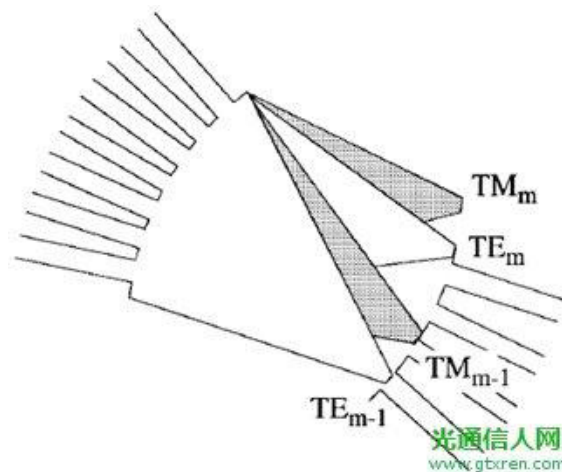


针对产生损耗的机制，减小 AWG 损耗的途径如下：

- 1) 在阵列波导接口位置，采用锥形设计逐步减小波导间隙，直至光刻极限；
- 2) 进行二次光刻，对阵列波导接口位置采用折射率差较小的材料组合。

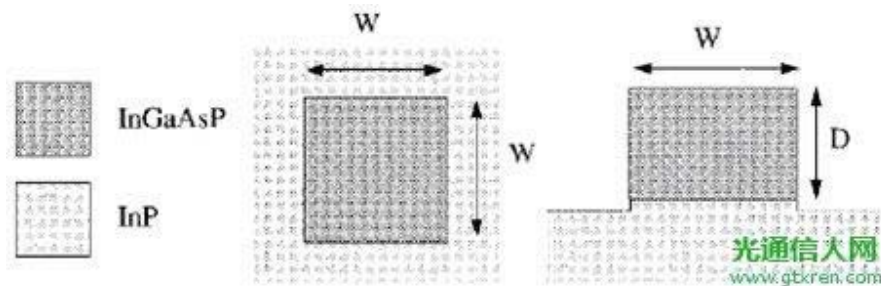
三、AWG 的消偏振设计

因阵列波导的双折射效应，TE 模和 TM 模的衍射聚焦位置不同，产生 PDL，甚至两个模式聚焦到不同波导中，如图 12 所示。

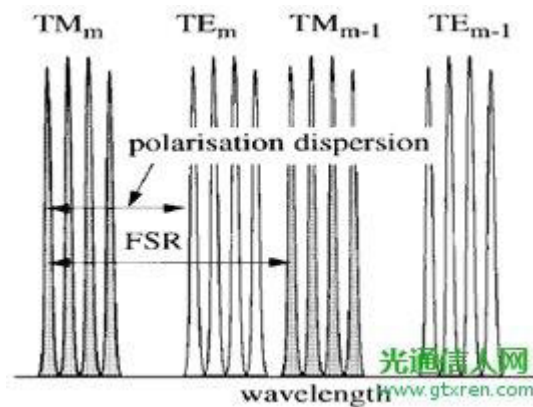


针对 PDL 的产生机制，消除的方法如下：

- 1) 采用零偏振波导：通过适当的参数设计和工艺优化，可以得到双折射系数极低的零偏振波导，如图 13 所示。



2)衍射级次匹配: 让 **AWG** 的 FSR 等于偏振引起的频移 Δf_{pol} , 则 TE 模的 m 级衍射波长与 TM 模的 $m-1$ 级衍射波长重合, 二者衍射角相同, 如图 14 所示。



AWG 工作原理和主要技术指标及设计和优化(4)

3)色散匹配设计: 在每条波导中插入一段双折射系数不同的波导, 其长度以 L 递增, 如图 15 所示。

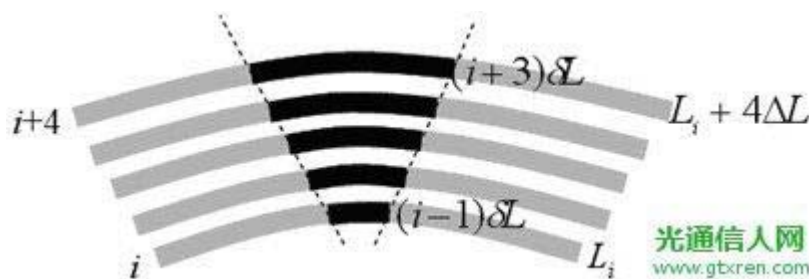


图 15.通过色散匹配实现消偏振

4)偏振分离输入: 将 TE 模和 TM 模分离之后再输入 **AWG**, 如图 16 所示。

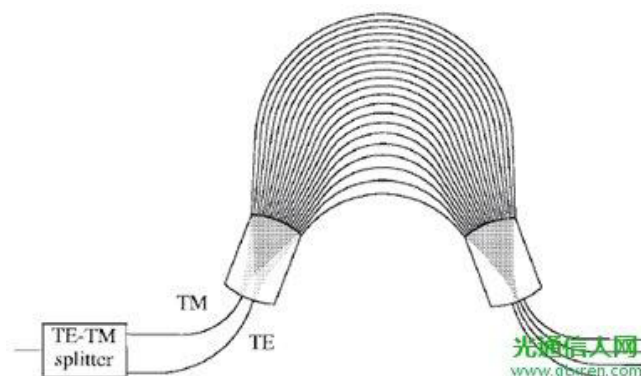
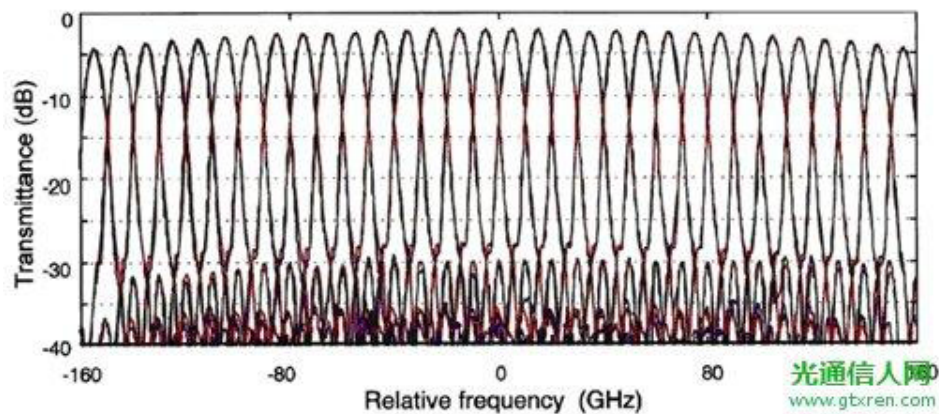


图 16.通过偏振分离输入实现

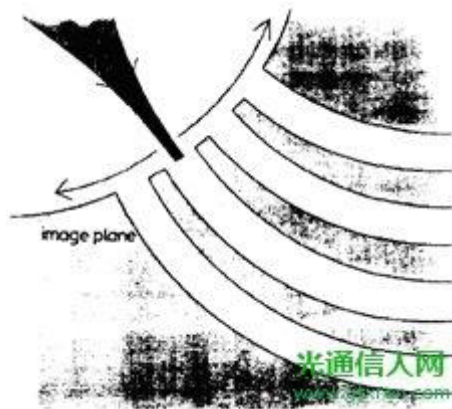
- 3)色散匹配设计：在每条波导中插入一段双折射系数不同的波导，其长度以 δL 递增，如图 15 所示。
- 4)偏振分离输入：将 TE 模和 TM 模分离之后再输入 AWG，如图 16 所示。
- 5)半波片法：在每条波导的中间插入一片半波片，使波导的前后两段发生 TE 模和 TM 模的转换。

四、AWG 的通带平坦化设计

阵列波导输出的光场，在输出波导的端口进行衍射重构，这个重构光场与输出波导的能量耦合所表现出来的波长特性，即为 AWG 的传输谱线。通带未优化的 AWG，表现为高斯型谱线，如图 17 所示，难以实用，因此必须进行通带平坦化设计。



- 1)采用多模输出波导：在输出星形耦合器中采用多模输出波导，如图 18 (a) 所示，衍射重构光场与多模波导的能量耦合，表现为平坦化的通带特性，如图 18 (b) 所示，因为输出波导为多模，该方法只能用于解复用器，并且解复用的信号只能由探测器接收，而不能无中继的继续传输。



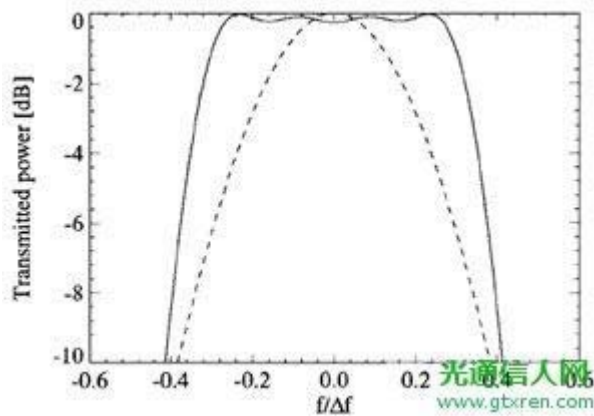
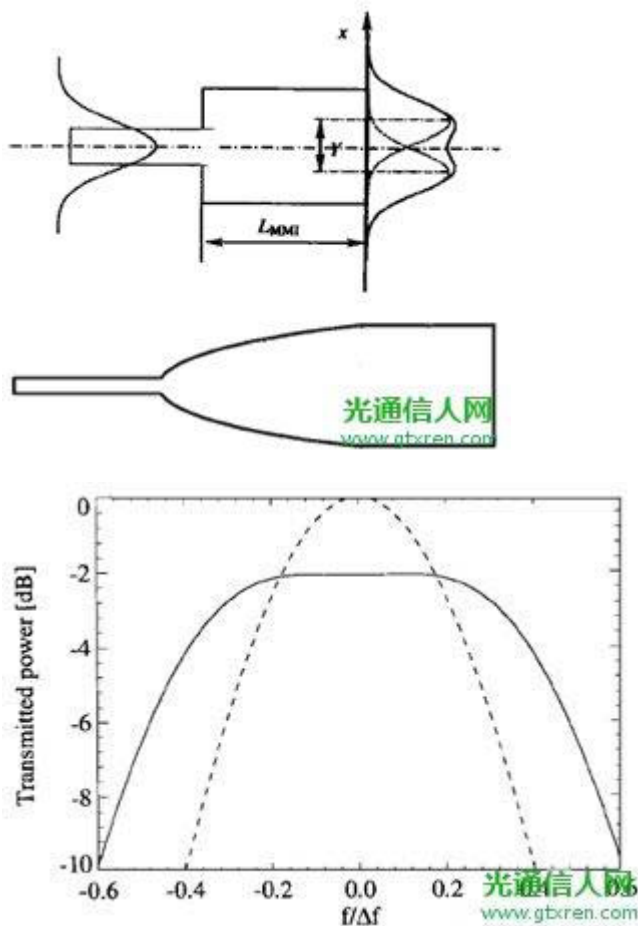


图 18. a)多模输出波导, b)通带特性

2)输入端接多模干涉 (MMI) 耦合器: 在输入波导与输入星形耦合器之间串接一个 MMI 耦合器, 将输入光场变成一个双峰波形, 如图 19 (a) 所示, 优化前后的通带特性分别如图 19 (b) 中的虚线和实线所示, 可以看到, 通带优化后的 **AWG**, 其损耗增加了大约 2dB。将 MMI 耦合器设计成牛角形状, 可以进一步优化损耗和通带特性。



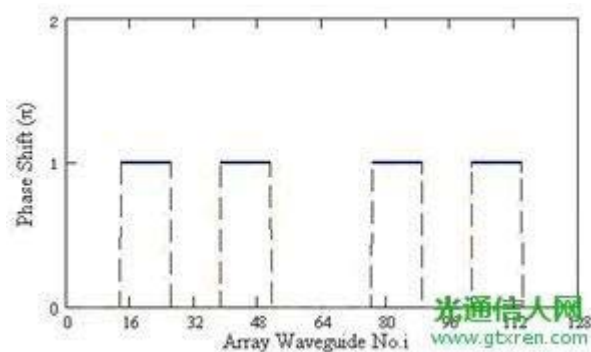
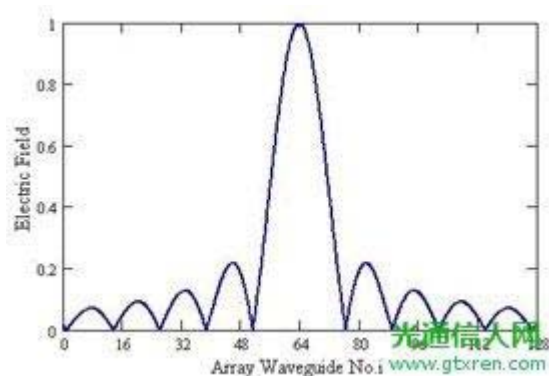
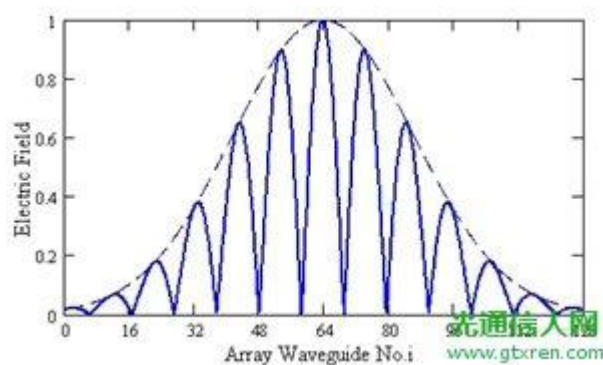
AWG 工作原理和主要技术指标及设计和优化(5)

图 19.a)输入端接 MMI 耦合器, b)优化前后的通带特性 3)在阵列波导输出端引入相移:

输出波导接收的光场为阵列波导输出位置光场的傅立叶变换，如果在阵列波导输出端得到 sinc 函数 ($\text{sinc}(x)=\sin x/x$) 分布的光场，则其通带图 19. a)输入端接 MMI 耦合器, b)优化前后的通带特性

3)在阵列波导输出端引入相移：输出波导接收的光场为阵列波导输出位置光场的傅立叶变换，如果在阵列波导输出端得到 sinc 函数 ($\text{sinc}(x)=\sin x/x$) 分布的光场，则其通带为近似矩形。

一般情况下，在阵列波导输出端得到的光场如图 20 (a) 所示；通过调整阵列波导输入端口径，可以改变其输出端光场，如图 20 (b) 所示；在某些波导的输出端引入 π 相移（可通过调整波导长度差来实现），如图 20 (c) 所示；阵列波导的最终输出光场为图 20 (b) 和 (c) 函数的乘积，如图 20 (d) 所示，其波形类似 sinc 函数分布，因此在输出波导可得到近似矩形的通带特性，如图 21 所示。



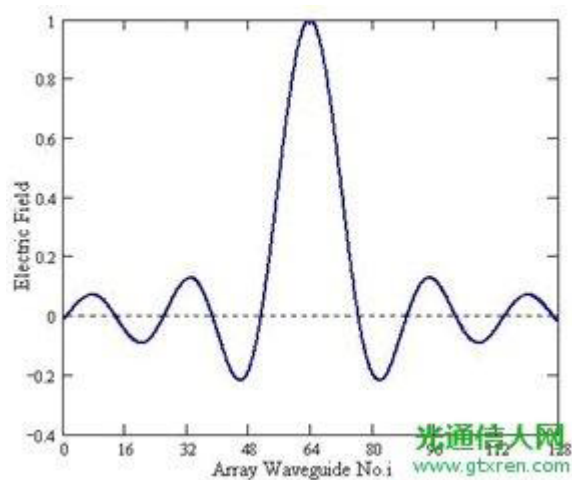


图 20. a)阵列波导输出端光场, b)通过改变阵列波导输入端口径得到的输出端光场, c)在某些阵列波导输出端引入相移, d)阵列波导最终输出光场为 c)和 d)两函数的乘积

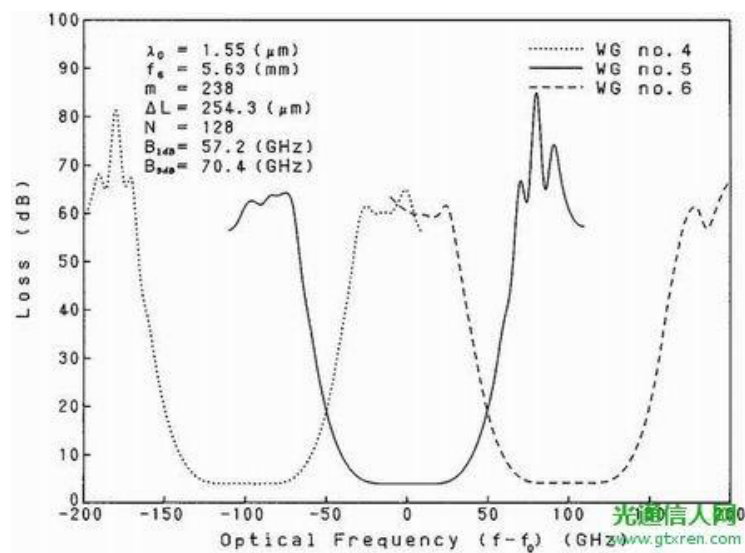


图 21.通过在阵列波导输出端引入相移得到的通带特性

4)输入端接 MZ 干涉器：在输入波导与输入星形耦合器之间串接一个 MZ 干涉器，如图 22 (a)

所示，输入星形耦合器将有两条输入波导，不同波长的光场在输入端呈现不同的分布情况，如图 22 (b) 所示。这样，在中心波长的附近，损耗将得到一定的平衡，从而实现平坦化的通带特性，如图 23 所示。

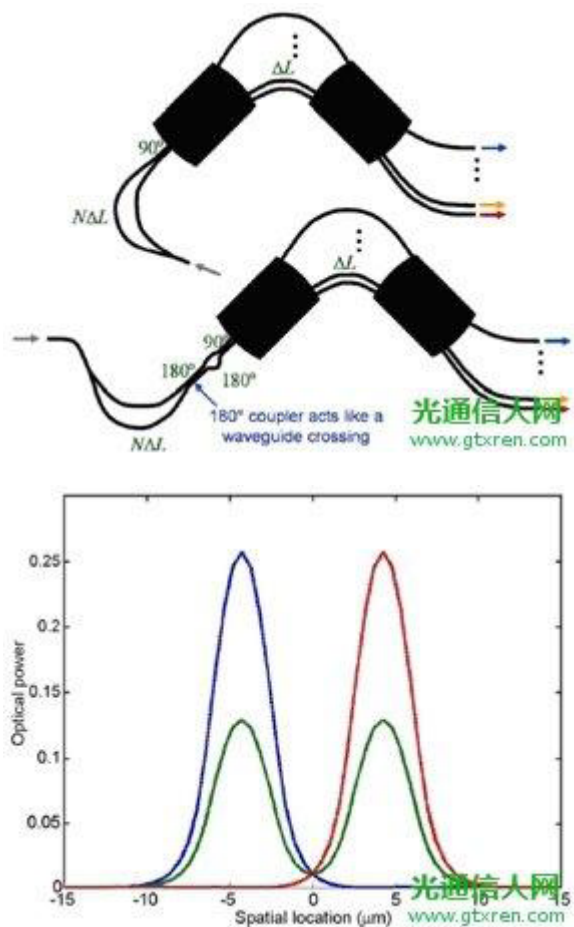


图 22. a)输入端接 MZ 干涉器的 AWG 结构, b)不同波长的光场在输入端分布情况

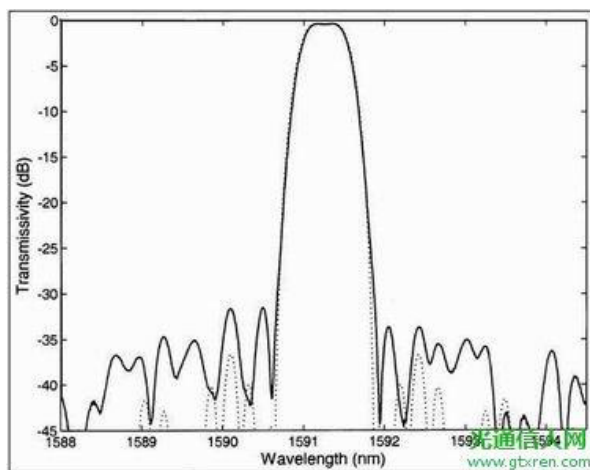


图 23. 通过在输入端接 MZ 干涉器得到的通带特性

前面两种方案, 其本质都是通过改变输入光场与输出光场之间的耦合特性来优化通带特性; 第三种方案是从傅立叶分析的角度实现通带平坦化; 第四种方案是在透彻理解输入波导平面与输出波导平面之间的镜像关系的基础上, 直接对通带内各波长的损耗进行均衡, 实现通带平坦化。

第一种优化方案存在应用局限性; 第三种优化方案工艺复杂, 难以控制; 第二种优化方案会

增加额外的损耗，大约 3dB；第四种优化方案工艺简单，也不会引起额外的损耗，通带平坦化之后的总损耗<3.5dB，缺点是串接的 MZ 干涉器会增加器件尺寸。

北京锦坤科技有限公司 www.jonkon.com.cn