

AWG 插入损耗性能的分析 and 改善

北京锦坤科技有限公司

www.jon-kon.com

摘要：**阵列波导光栅(AWG)**是实现密集波分复用(DWDM)光网络的理想器件，插入损耗是它的一个重要性能指标。文章在综述了多种减小 **AWG** 器件插入损耗方法的基础上，分析了如何使用楔形波导结构来降低模式失配所导致的耦合损耗。这种方法可以在不增加器件制作难度的同时大大降低 **AWG** 的插入损耗，并且适用于各种材料和结构的 **AWG** 器件设计。

关键词：密集波分复用；**阵列波导光栅**；插入损耗；楔形波导

阵列波导光栅(AWG)是实现多通道密集波分复用(DWDM)光网络的最理想器件。它是一种基于平面光波回路(PLC)技术的角色散型无源器件，由一个相位控制器，一个衍射光栅和输入 / 输出波导组成。与其他光栅技术相比，**AWG** 具有设计灵活、插入损耗低、滤波特性良好、性能长期稳定、易与光纤有效耦合和适于大批量生产等优点，在 **DWDM** 光网络中得到了广泛的应用，可以实现滤波、复用 / 解复用、光分插复用(OADM)等功能。

AWG 是一种无源光器件，插入损耗是它的一项重要性能指标。近年来，人们在降低 **AWG** 器件的插入损耗方面做了大量的研究，提出了许多实用的设计方法。本文介绍了 **AWG** 的基本原理以及在降低器件插入损耗方面的最新进展，并在理论上分析了楔形波导结构对模场失配的优化作用，最后给出了 **8** 通道的 **AWG** 解复用器的模拟结果。

1 **AWG** 的基本原理及其损耗特性

1.1 **AWG** 的基本原理

AWG 基于凹面光栅原理，1988 年由荷兰人 M. K. Smit 提出^[1]。**AWG** 将凹面光栅的反射式结构拉成传输式结构，输入和输出波导分开，并用波导对光进行限制和传输，取代光在自由空间中的传播。利用这种传输式结构可在光的传播中引入一个较大的光程差，使光栅工作在高阶衍射状态，提高了光栅的分辨率。

AWG 复用 / 解复用器的结构如图 1 所示，它由集成在同一衬底上的输入 / 输出波导、阵列波导和两个聚焦平板波导组成。输入 / 输出波导位于 Rowland

圆的圆周上,对称地分布在器件的两端.阵列波导中相邻波导的长度差为一常数,可对入射光的相位进行周期性调制,因此称这种器件为 **AWG**.不同波长的光信号进入输入波导,在平板波导内自由传播,并耦合入阵列波导,经过阵列波导的色散作用,引起波前倾斜,在输出波导的不同位置上成像,完成解复用功能.反之,可将不同输入波导中的具有不同波长的光信号汇集到同一根输出波导中,完成复用功能.

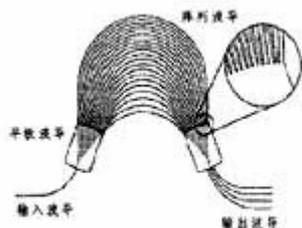


图1 AWG复用/解复用器结构图

1.2 **AWG** 的插入损耗分析

在实际应用中, **AWG** 通常作为多功能器件中的组件,由于插入损耗在多个节点的积累作用,系统性能会随节点数的增加而恶化,因此在各种无法使用光放大器的接入网中,对 **AWG** 器件的插入损耗提出了很高的要求.同时,随着器件尺寸的增加, **AWG** 的插入损耗也会相应增大,通常器件尺寸增加一倍,插入损耗将有 3 dB 左右的恶化.因此对于多通道的 **AWG** 器件,插入损耗是一个重要的性能指标.

AWG 器件的损耗分为两类,一类是在阵列波导和平板波导中由于吸收和散射等原因引起的传输损耗,其典型值为 2 dB;另一类是由于模式失配造成的转换损耗.转换损耗有两个主要来源,一是平板波导和阵列波导之间的过渡损耗,光栅阵列波导之间存在间隙,由此导致平板波导和阵列波导的模场失配,产生耦合损耗,而间隙的尺寸受到器件制作精度的限制.转换损耗的另一个来源则是光纤与波导之间的模场失配引起的连接损耗,这种损耗会随着光纤与波导的芯层尺寸和折射率的不同组合而变化.

要有效降低 **AWG** 器件的插入损耗,关键在于减小光场传输过程中由于各种模式失配造成的转换损耗.光纤与波导的连接损耗可以通过选择波导芯层与覆盖层的折射率差 Δ 来减小,使用 0.45% 的折射率差 Δ 可以明显减小这类损耗^[2].而对于平板波导和阵列波导之间的过渡损耗,是由 **AWG** 本身的结构产生的,对器件性能的影响很大,人们提出了许多方法来减小这一固有损耗.例如,对于 InP 一基和 Si 一基的 **AWG** 可使用两次刻蚀的垂直楔形波导结构来优化器件性能^[3].另外, Maru 等人提出在平板波导和阵列波导之间通过紫外光照射引入高折射率区域,以减小平板波导与阵列波导的耦合损耗,从而降低器件的插入损耗^[4],

其结构如图 2 所示. 经过 60min 的紫外光照射, **AWG** 器件的插入损耗可以达到最小值 3. 0 dB.

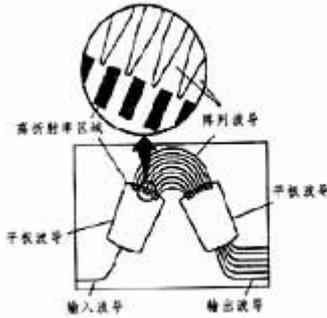


图 2 低损耗的 AWG 结构示意图

最近有文献报导, 在 **AWG** 的平板波导中加入相位调整元素——岛(周期性排列的折射率变化区域), 可有效地降低器件的插入损耗^[5]. 由于折射率的差异, 岛区域内和平板波导区域内传播的光场具有不同的相速度, 它们相互叠加的结果, 可以使传播光场与阵列波导本征模场失配造成的损耗大大减小. 实验中选择岛区域的折射率与器件覆盖层的折射率相同, 可将插入损耗由 9. 3 dB 降至 1. 3 dB.

以上各种降低插入损耗的办法大多是针对 InP—基和 Si—基 **AWG** 器件的, 而且这些方法或者需要附加的控制和稳定装置, 或者会增加器件的制作难度, 提高对工艺容差的要求, 与实用化的目标尚有一段距离. 如果在不同结构的波导的连接处增加渐变的过渡区, 不但能够极大地降低转换损耗, 而且适用于各种材料和结构的 **AWG** 器件的设计. 下面我们对这种简单而有效的设计方法进行分析, 并给出模拟结果.

2 理论分析及模拟结果

2. 1 过渡区理论

根据光波导理论, 光场在两种不同的波导中传输, 由于模场的失配, 会产生相当大的反射和模式转换, 导致光场能量的极大损耗. 通过在波导的连接处加入渐变的过渡区, 可以在各种不同的模场之间进行平滑的转换, 有效地减小耦合损耗. 从实用的角度来说, 最简单的过渡区形状是渐变楔形.

楔形区域中的损耗主要由 3 部分构成: 传输损耗、模式转换造成的辐射损耗和由于波导表面粗糙或折射率不均匀引起的辐射损耗. 在极短的长度范围内, 楔形区域中的损耗主要表现为模式转换损耗, 而在距离较长的情况下, 则以非理想的波导特性造成的辐射损耗为主. 下面我们主要分析模式转换带来的损耗.

在楔形区域中, 基模与高阶模相互作用, 尤其是与相邻的高阶模作用, 产生能量的转移, 其基模能量大部分转化到相邻的高阶模中, 并且当这个高阶模在楔

形区域的单模端附近截止时，能量就会辐射出去。根据过渡区理论，两种不同光场模式(模式 m 和模式 n)之间的能量转移因子 P_{mn} 满足 [6] $P_{mn} =$

$$\frac{\kappa_{mn}^2}{\kappa_{mn}^2 + \Delta\beta_{mn}^2},$$

式中, κ_{mn} 为耦合系数; $\Delta\beta_{mn}$ 为传播常数差, 满足 $2\Delta\beta_{mn} = \beta_m - \beta_n$. 而 κ_{mn} 和 $\Delta\beta_{mn}$ 都与楔形过渡区的形状和尺寸有关.

在弱耦合条件下 $|\kappa_{mn}| \ll |\Delta\beta_{mn}|$, 则能量转移

$$P_{mn} = \frac{\kappa_{mn}^2}{\Delta\beta_{mn}^2},$$

$$\text{即} \quad \sqrt{P_{mn}} = \frac{\kappa_{mn}}{\Delta\beta_{mn}}. \quad (1)$$

为了减弱基模与高阶模的这种相互作用, 并且降低辐射损耗, 楔形必须做得比较长而且是渐变的. 由于 κ_{mn} 和 $\Delta\beta_{mn}$ 均与楔形区域的几何参数有关, 我们可以根据所期望的能量转移因子 P 的大小, 通过求解方程(1)来确定过渡区的形状及最小长度. 但在通常情况下, 方程(1)只能通过数值方法求解.

计算和分析表明, 如果楔形过渡区足够长(通常为几百 μm), 并且是缓慢变化的, 即楔形分叉角足够小(通常 $< 1^\circ$), 过渡区域内的损耗将会很小. 这时, 过渡区的形状(如线型、指数型、抛物型等)就不重要了, 可以采用最简单的线型过渡区. 若楔形区域无限长, 就是严格无损耗的理想状态. 我们模拟了采用不同长度的过渡区时, 波导中的光功率与传播距离的关系, 结果如图 3 所示. 从图中可以看出, 在没有过渡区($0\mu\text{m}$)时, 总的输出功率低于 93%, 而随着过渡区域长度的增加, 波导之间的耦合损耗大大地降低了.

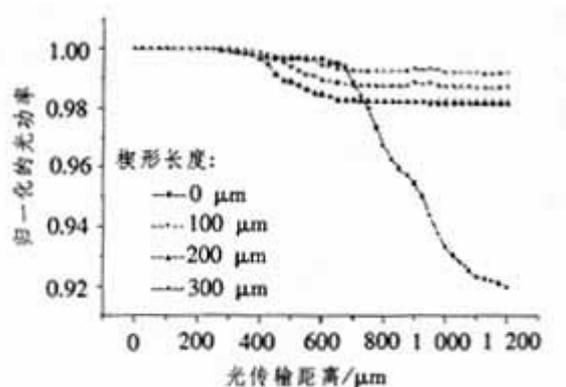


图 3 过渡区长度不同时波导中传播的光场的总功率

2.2 模拟结果

从上面的分析可以知道,在不同结构的波导之间加入渐变的过渡区可以减小导模光场的发散,降低插入损耗.而且,过渡区的制作只需改变波导的宽度,可以方便地通过光刻掩膜版的设计来实现.通过优化过渡区的分叉角、长度以及折射率等参数,可以使器件的插入损耗达到期望值. **AWG** 的设计可以采用这一简单有效的方法,在平板波导与输入/输出波导及阵列波导之间加入楔形结构,不增加器件制作的难度,并且能够大大降低 **AWG** 的插入损耗.我们以一个 8 通道的 **AWG** 器件为例(设计参数列于表 1),采用光束传播法(BPM)模拟了楔形结构对插入损耗的优化作用.

表 1 AWG 复用/解复用器的设计参数

设计参数	设计值
中心波长	1 550 nm
信道数	8
通道间隔	100 GHz
自由谱范围	1 200 GHz
波导尺寸	5 μm \times 5 μm
衍射阶数	164
阵列波导长度差 ΔL	75.467 μm
阵列波导数目	30

首先在输出波导处加入楔形结构(线型,长度 100 μm ,分叉角 0.8 $^\circ$),增加波导的有效接收宽度,同时增大进入信道的波长范围,降低插入损耗.这一方法在需要较大的信道带宽或平坦的通带谱响应时,85 可以产生很好的效果.模拟结果如图 4 所示.点线为没有楔形波导的情况,实线是有楔形波导的情况,可以看到,总的插入损耗降低了 2 dB 左右,同时信道带宽增大了.

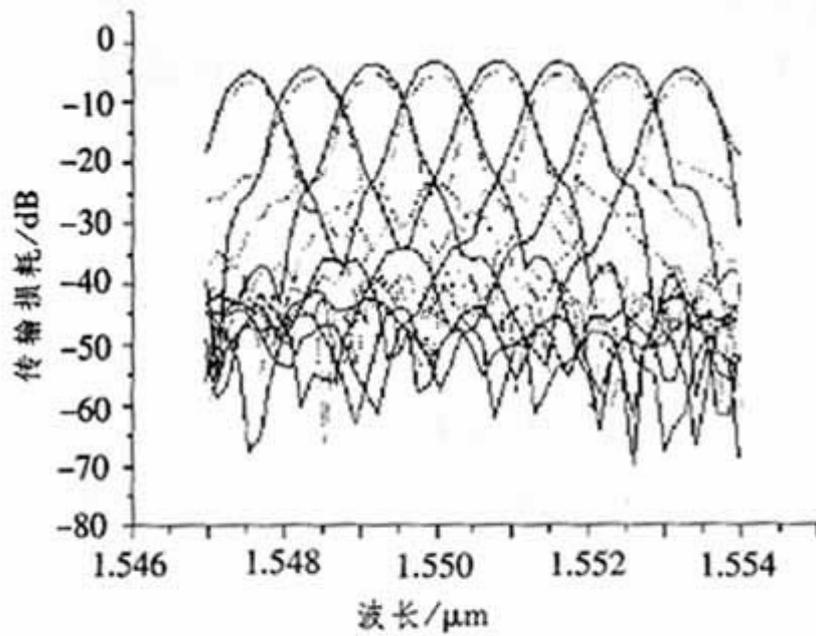


图 4 在输出端加入楔形过渡区后
AWG 性能的改善

在阵列波导末端采用楔形结构可以更有效地减小器件的插入损耗。光场传播到 **AWG** 输入聚焦平板波导的末端，并以平面波的方式耦合入阵列波导。当有些光场模式不能有效地耦合入阵列波导时，就会产生一些损耗。而波导末端的楔形部分产生平滑的过渡，可以降低损耗。图 5 显示了阵列波导末端的楔形结构(线型，长度 $100\mu\text{m}$ ，分叉角 0.8°)对降低 **AWG** 插入损耗的作用。可以看到，楔形结构除了改变插入损耗外不改变器件的其他任何性质，并且每一个信道和波长的插入损耗都被同等地降低了 4dB 。

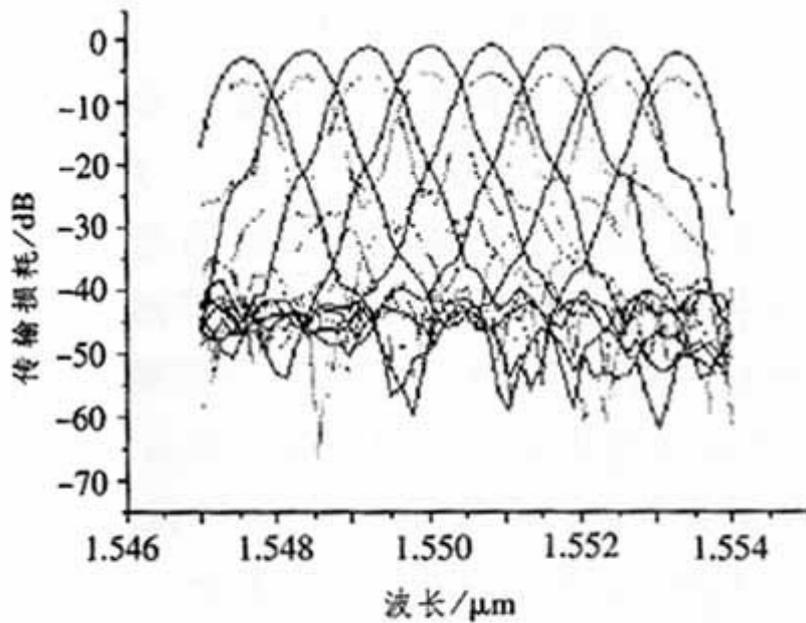


图5 在阵列波导末端加入楔形过渡区后对 AWG 性能的改善

3 结束语

AWG 是 DWDM 光网络中的关键器件之一，尤其在多通道的 DWDM 系统中，AWG 的插入损耗是一个重要的性能指标。本文综述了多种减小 AWG 插入损耗的方法，并分析了如何使用楔形波导结构来降低模式失配所导致的耦合损耗。这种方法原理简单，可以通过光刻掩模版的设计方便地实现，在不增加器件制作难度的同时大大降低 **AWG** 的插入损耗，并且适用于各种材料和结构的 AWG 器件设计，是一种灵活、简单且有效的方法。

参考文献：

- [1] Smit M K. Newfocusing and dispersive planar component based on an optical phased array [J]. Electronics Letters, 1988, 24(7): 385—386.
- [2] Takagi A, Kaneko A, Ishii M, et al. Low-loss and flat pass-band 1×8 arrayed-waveguide grating multi / demultiplexers with a thermal spectrum for metropolitan area networks [A]. OFC2000 [C]. Baltimore: 2000. WH5: 1—3.
- [3] Sugita A, Kaneko A, Okamoto A, et al. Very low insertion loss arrayed-waveguide grating with vertically tapered waveguides [J]. Photonics

Technology Letters, 2000, 12(9): 1180—1182.

[4] Maru K, Chiba T, Okawa M, et al. Low-loss arrayed-waveguide grating with high index regions at slab-to-array interface [J]. Electronics Letters, 2001, 37(21): 1287—1289.

[5] Junji Yamauchi, Yuichi Yamamoto. A novel AWG demultiplexer composed of slabs with islands [A]. OFC2002 [C]. Anaheim, California: 2002. ThGG36.

[6] Spörleder F, Unger H G. Waveguide taper transitions and couplers [M]. London and New York: The Institute of Engineers, 1979.

北京锦坤科技有限公司

www.jon-kon.com