

AWG 结构的优化设计

张小康^{1,2} 廖常俊² 刘颂豪²

(1 华南理工大学应用物理系, 广东, 广州 510640)

(2 华南师范大学量子电子学研究所, 广东, 广州 516031)

摘要 通过分析 AWG 中心波导倾角特性, 优化焦点间距, 提出了两个结构约束方程, 得出了结构紧凑的 AWG 设计方法. 根据这一方法, 可以由一定损耗条件下的最小弯曲半径和接口参数—接口处输入/输出波导间距和最短直波导长度, 优化并完全确定其它结构参数, 从而得到最小面积的 AWG 波导结构. 最后给出了优化设计实例.

关键词 AWG; 结构约束方程; 几何结构参数; 优化设计; 最小弯曲半径; 接口参数

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

0 引言

从 1988 年 AWG 解复用器刚出现至今, 已有许多关于 AWG 设计工作的报道^[1-6]. 但讨论几何结构设计文章很少. 最简单的结构是, 每条阵列波导由两条圆弧波导和三条直波导构成, 所有圆弧波导的曲率半径都相同^[7]. 现在多数采用的结构是, 每条阵列波导由一条圆弧波导和两条直波导构成, 圆弧波导的曲率半径各不相同. 人们已得出这种结构的解析表达式, 但认为其几何结构参数不能唯一确定, 也没有介绍设计实例中几何结构参数的选取依据^[6]. 因此, 在结构设计中, 还不能很好地控制器件面积. 而通讯容量的增加已经对器件结构的紧凑设计提出了要求^[7,8].

本文通过分析中心波导倾角特性, 优化焦点间距, 使阵列波导获得最小横向尺寸; 在由几何关系建立的结构方程的基础上, 提出了两个新的约束方程, 由此可优化并完全确定输入/输出波导的其它结构参数, 得到紧凑的输入输出波导结构. 根据这一设计方法, 由波导的最小曲率半径、接口处输入/输出波导间距以及接口处输入/输出波导的最短直波导长度, 能优化并完全确定其它结构参数, 获得最小横向尺寸的器件结构. 为验证本文提出的设计方法, 对文献[6]中的设计实例进行了重新设计, 在满足同样技术参数的条件下, 使器件面积明显减小了. 本文提出的设计方法, 将能满足有效晶片面积上制作更大信道数的 AWG 的实际需要.

1 AWG 的结构设计

$P \times P$ 阵列波导光栅 (AWG) 由 P 条输入波导, P 条输出波导, Q 条阵列波导, 和两个聚焦块波导组

成, 它们都集成在同一衬底上. 相邻阵列波导的长度差为常数 ΔL , 光波由输入波导进入输入聚焦块波导, 通过阵列波导后, 在输出块波导上相干聚焦, 并耦合到输出波导. 输入/输出波导的一端和波导阵列的两端都位于罗兰圆周上, 输入/输出波导的另一端是与光纤或其它器件耦合的接口端.

1.1 阵列波导结构参数的关系

图 1 是对称型 AWG 几何结构的一半, 图中的每条阵列波导是对应的 AWG 阵列波导长度的 1/2, 总共有 $Q = 2M + 1$ 条, 它由一段直波导和一段圆弧形波导组成. 将 L_{ZL} 定义为焦点 F 到原点 O 的距离, 它是两个块波导的焦点 F 之间的距离的一半.

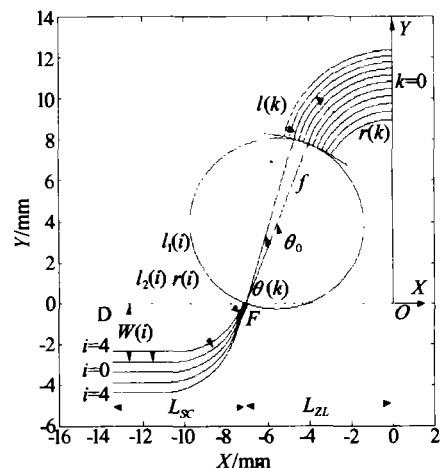


图 1 阵列波导光栅 (AWG) 左半结构图
Fig. 1 Schematic diagram of left half an AWG

第 k 条阵列波导的直波导长度为 $l(k)$, 其端点到焦点 F 的连线与 L_{ZL} 的夹角为 $\theta(k)$, 中心波导端点到焦点 F 的连线与 L_{ZL} 的夹角称为中心信道倾角 θ_0 ; 圆弧形波导的曲率半径为 $r(k)$, 圆心角也是 $\theta(k)$. 第 k 条阵列波导的总长为 $L(k)$, 相邻波导长度差为 $\Delta L/2$. 由图 1 中的几何关系可推导出

$$l(k) = \frac{L(k) \sin \theta(k) - \theta(k) \{L_{ZL} - f \cos \theta(k)\}}{\sin \theta(k) - \theta(k) \cos \theta(k)}$$

$$(k = -M, -M+1, \dots, M) \quad (1)$$

$$r(k) = \frac{L_{ZL} - [f + L(k)] \cos \theta(k)}{\sin \theta(k) - \theta(k) \cos \theta(k)} \quad (2)$$

$$(k = -M, -M+1, \dots, M)$$

式中

$$\theta(k) = \theta_0 + k\Delta\theta_{ZL} \quad (3)$$

$$L(k) = l(-M) + r(-M)\theta(-M) + (k+M)\frac{\Delta L}{2} \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)中, f 是聚焦块波导的焦距, $l(-M)$, $r(-M)$ 和 $\theta(-M)$ 分别是第 $-M$ 条阵列波导中直波导的长度、圆弧波导的曲率半径和圆心角, $\Delta\theta_{ZL}$ 是相邻波导的角间距. 假设, $l_0 = l(-M)$, 由式(2)、(4)得到

$$r(-M) = \frac{L_{ZL} - (f + l_0) \cos(\theta_0 - M\Delta\theta_{ZL})}{\sin(\theta_0 - M\Delta\theta_{ZL})} \quad (5)$$

上述公式中 f 和 $\Delta\theta_{ZL}$ 由器件的性能参数确定. 只有 L_{ZL} , θ_0 和 l_0 这几个结构参数确定了, 才能完全确定各条阵列波导的 $l(k)$ 和 $r(k)$.

1.2 输入/输出波导结构参数的关系

输入/输出波导有 $P = 2N + 1$ 条, 如图 1 所示. 每条输入/输出波导由两段直波导和一段圆弧波导构成, 设第 i 条输入/输出波导的接口端到 x 轴的距离为 $W(i)$, 输入/输出波导接口端的间距为 ΔW . 假设第 i 条波导的两段直波导部分的长度分别为 $l_1(i)$ 和 $l_2(i)$, 圆弧波导的曲率半径为 $r(i)$, 圆心角为 $\theta(i)$, $l_2(i)$ 与 X 负方向的夹角也等于 $\theta(i)$, 第 i 条波导的总长为 $L(i)$, 由图 1 中的几何关系得

$$l_1(i) + r(i) \sin \theta(i) + l_2(i) \cos \theta(i) + f \cos(i\Delta\theta_{SC}) \cos \theta(i) - f \cos \theta_0 = L_{SC} \quad (6)$$

$$r(i) - r(i) \cos \theta(i) + l_2(i) \sin \theta(i) + f \cos(i\Delta\theta_{SC}) \sin \theta(i) - f \sin \theta_0 = W(i) \quad (7)$$

式中, L_{SC} 是焦点 F 到输入/输出波导端口在 X 方向的距离, $\Delta\theta_{SC}$ 是相邻直波导 $l_2(i)$ 的角间距. 由式(6)、(7)可推导出

$$l_2(i) = \frac{B(i) \sin \theta(i) - A(i) [1 - \cos \theta(i)]}{1 - \cos \theta(i)} \quad (8)$$

$$(i = -N, -N+1, \dots, N)$$

$$r(i) = \frac{A(i) \sin \theta(i) - B(i) \cos \theta(i)}{1 - \cos \theta(i)} \quad (9)$$

$$(i = -N, -N+1, \dots, N)$$

式中

$$A(i) = L_{SC} - l_1(i) + f \cos \theta_0 - f \cos(i\Delta\theta_{SC}) \cos \theta(i) \quad (10)$$

$$B(i) = W(i) + f \sin \theta_0 - f \cos(i\Delta\theta_{SC}) \sin \theta(i) \quad (11)$$

$$\theta(i) = \theta_0 + i\Delta\theta_{SC} \quad (12)$$

$$W(i) = W_0 + (i + N)\Delta W \quad (13)$$

$$l_1(i) = l_{1\min} + (N - i)\Delta l_1, l_1(-N) = l_{1\min} + 2N\Delta l_1 \quad (14)$$

式中, $W_0 = W(-N)$ 和 $l_1(-N)$ 是第 $-N$ 条波导的相应参量, Δl_1 是相邻直波导 $l_1(i)$ 的长度差. $l_{1\min}$ 是 $l_1(i)$ 中最短的直波导长度. 上面各式中, 除了 $\Delta\theta_{SC}$ 和 f 由器件性能参量确定外, 还需要确定了 L_{SC} , W_0 , ΔW , $l_{1\min}$ 和 Δl_1 等结构参量之后, 才能完全确定每一条波导的 $l_1(i)$, $l_2(i)$ 和 $r(i)$.

2 AWG 结构参量的优化设计

从式(1)、(2)、(6)和(7)可以看出, 在相同的技术参量 f , $\Delta\theta_{ZL}$ 和 $\Delta\theta_{SC}$ 条件下, 结构参量的选择有很大的自由度, 说明器件设计可进一步优化. 对于不同的结构参量, 阵列波导和输入/输出波导的长度、形状可以有很大差别, 所得到的器件面积大小也有很大差别. 我们知道, 随着通讯信息量的快速增长, AWG 的信道数也在不断提高, 日本 NTT 光子学实验室已研制出了有 256 个信道的 AWG^[9]. 可是, 要继续提高 AWG 的信道数, 必将受限于晶片面积的大小. 因此, 必须考虑结构参量的优化, 在满足 AWG 性能参量的前提下优化结构参量, 使器件占有面积最小.

2.1 阵列波导结构参量的优化设计

2.1.1 L_{ZL} 与 θ_0 的关系

首先, 由于波导长度越小, 越有利于降低损耗, 令

$$l(-M) = l_0 = 0 \quad (15)$$

再令 $r(-M) = r_{\min}$, r_{\min} 是满足一定弯曲损耗要求的最小弯曲半径. 在式(2)中, 当 $k = -M$ 时, 将式(15)代入式(4)中, 再将式(4)代入式(2), 得

$$L_{ZL} = f \cos(\theta_0 - M\Delta\theta_{ZL}) + r_{\min} \sin(\theta_0 - M\Delta\theta_{ZL}) \quad (16)$$

若取

$$f = 8.34 \text{ mm}, M = 45, r_{\min} = 3.6 \text{ mm},$$

$$\Delta\theta_{ZL} = 0.0032 \text{ rad} \quad (17)$$

由式(16)得到 L_{ZL} 随 θ_0 变化的规律如图 2 所示. 从图中可看出, 当 θ_0 大于 0.55 rad 后, L_{ZL} 随着 θ_0 的增大而减小, 即选取较大的 θ_0 , 可以获得较小横向尺寸的阵列波导.

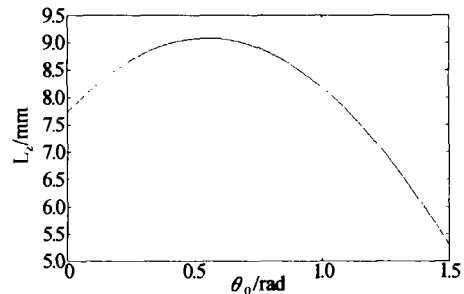


图 2 $L_{ZL} \sim \theta_0$ 曲线

Fig. 2 Variation of the distance L_{ZL} with the central angle θ_0

2.1.2 $l(k)$ 与 θ_0 的关系

将式(15)代入式(4)后,再将式(3)、式(4)和式(16)代入式(1),整理后得

$$l(k) = \frac{[r_{\min}(\theta_0 - M\Delta\theta_{ZL}) + (k + M)\frac{\Delta L}{2}] \sin(\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL}) + f(\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL}) \cos(\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL})}{\sin(\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL}) - (\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL}) \cos(\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL})} - \frac{(\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL}) [r_{\min} \sin(\theta_0 - M\Delta\theta_{ZL}) + f \cos(\theta_0 - M\Delta\theta_{ZL})]}{\sin(\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL}) - (\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL}) \cos(\theta_0 + k\Delta\theta_{ZL})} \quad (18)$$

考查 $k = -44, 0, 45$ 时, $l(k)$ 随 θ_0 变化的规律. 将式(17)中的参量代入式(18), $l(k)$ 随 θ_0 变化的规律如图3所示. 从图中看出,随着 θ_0 的增大, $l(-M+1) = l(-44)$ 很快趋近于零,另外两条曲线都有小于零的取值. 可以判断,所有 $l(k)$ ($k \neq -M$)中, k 越大, $l(k)$ 越先达到0,即 $l(M)$ 随着 θ_0 的增大最先到达0. 由于 $l(k)$ 不能取负值,因此,在式(18)中,令 $k = M$,由 $l(M) = 0$,可以求出最大的中心波导倾角 θ_0 ;再根据式(16),就可得到最小的 L_{ZL} . 将 θ_0 和 L_{ZL} 代入式(1)~(3),可完全确定每条阵列波导的参量 $l(k)$ 、 $r(k)$ 和 $\theta(k)$. 因此,通过分析中心波导倾角 θ_0 ,获得最小焦点间距 $2L_{ZL}$,可得到横向尺寸最小的阵列波导.

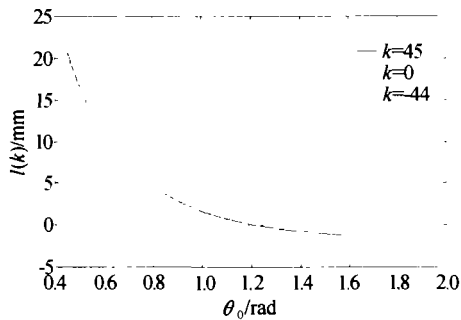


图3 $l(k) \sim \theta_0$ 曲线

Fig. 3 Variation of the length of the straight part $l(k)$ with the central angle θ_0

2.2 输入/输出波导结构参数的优化设计

在输入/输出波导的结构参量中, ΔW 是输入/输出波导接口端的间距, $l_{1\min}$ 是输入/输出接口端最短的直波导长度,我们认为,应根据AWG与光纤或其它器件耦合的需要,确定它们的数值, ΔW 和 $l_{1\min}$ 应该统一化标准化,因此,把这两个参量称为接口参量. 于是,在输入/输出波导设计中还需要确定的参量是 W_0 、 Δl_1 和 L_{SC} .

2.2.1 确定 W_0

在式(7)中,取 $i = -N$,其中, $[f \cos(N\Delta\theta) \cdot \sin\theta(-N) - f \sin\theta_0]$ 是第 $-N$ 条输入输出波导的起点与焦点 F 在垂直方向上的距离. 通常这条波导弯曲部分的起点在垂直方向上的位置不高于焦点 F ,那么, $l_2(-N)$ 应该满足约束方程

$$l_2(-N) \geq \frac{f \sin \theta_0}{\sin \theta(-N)} - f \cos(i\Delta\theta_{SC}) \quad (19)$$

又令

$$L_{SC} - l_1(-N) \equiv L_{SC}l \quad (20)$$

$L_{SC}l$ 是第 $-N$ 条波导中, $l_2(-N)$ 和 $r(-N)$ 部分在 X 方向上的宽度. 在 $r(-N) = r_{\min}$ 的条件下,由式(6)得

$$L_{SC}l = r_{\min} \sin \theta(-N) + l_2(-N) \cos \theta(-N) + f \cos(-N\Delta\theta_{SC}) \cos \theta(-N) - f \cos \theta_0 \quad (21)$$

从式(21)可看出,选取较小的 $l_2(-N)$,可得到较小的 $L_{SC}l$,从而,使输入/输出波导的横向尺寸较小. 因此,根据式(19)选取最小的 $l_2(-N)$,再由 $l_2(-N)$ 、式(7)、(13),令 $i = -N$,就可确定 W_0 ,即

$$W_0 = r_{\min} [1 - \cos \theta(-N)] + l_2(-N) \sin \theta(-N) + f \cos(N\Delta\theta_{SC}) \sin \theta(-N) - f \sin \theta_0 \quad (22)$$

2.2.2 确定 Δl_1

将式(14)代入式(6)后,对于第 $-N$ 条波导有

$$L_{SC} = l_{1\min} + 2N\Delta l_1 + r_{\min} \sin \theta(-N) + l_2(-N) \cos \theta(-N) + f \cos(N\Delta\theta_{SC}) - f \cos \theta_0 \quad (23)$$

从前面的讨论可知,在式(23)中,只有 L_{SC} 和 Δl_1 是还未确定的参量,仅从式(23)看, Δl_1 越小,似乎 L_{SC} 也越小,使输入/输出波导的横向尺寸更小. 但发现,当 Δl_1 小于一定数值后,将出现 $r(i+1) < r(i)$,这与前面的设定 $[r(-N) = r_{\min}]$ 发生矛盾. 进一步计算发现,只要下面的不等式成立,就能满足 $r(i+1) \geq r(i)$.

$$r(-N+1) \geq r_{\min} \quad (24)$$

由式(24)推导出了下面的约束方程2

$$\Delta l_1 \geq \{r_{\min} + [W_0 + \Delta W + f \sin \theta_0 - r_{\min}] \cos \theta(-N+1)\} / \sin \theta(-N+1) - L_{SC}l - f \cos \theta_0 \quad (25)$$

按约束方程2,选取最小的 Δl_1 ,就能得到最小的 L_{SC} ,从而,使输入/输出波导的横向尺寸最小. 由式(14)、(20)得到,输入/输出波导的横向尺寸为

$$L_{SC} = L_{SC}l + l_{1\min} + 2N\Delta l_1 \quad (26)$$

在上述优化过程中,在由几何关系得到的方程(1)、(2)、(6)和(7)基础上,提出了两个新的约束方程式(19)和式(25),根据这些方程,由最小弯曲

半径 r_{\min} 、输入/输出波导接口处的标准参量:波导间距 ΔW 和最短直波导长度 l_{\min} ,就能推导出其它结构参量: W_0 、 Δl_1 和 L_{sc} ,最后能得到结构紧凑的输入/输出波导结构。

3 设计实例

一个 11×11 的用聚合物材料制作的 AWG 复用器,在结构设计中使用的技术参量如表 1 所示^[6]。

表 1 聚合物 AWG 复用器的技术参量

中心波长 λ_0	1.550918 μm	块波导的焦距 f	8340 μm
导波层折射率 n_1	1.495	输入/输出信道数 $2N+1$	11
包层折射率 n_2	1.483	阵列波导数 $2M+1$	91
相邻波导间距 d	26.3 μm	相邻阵列波导长度差 ΔL	81.30 μm

为简化计算,假设阵列波导和输入/输出波导与块波导连接处的间距均为 d ,它们的角间距也相同,为

$$\Delta\theta_{zl} = \Delta\theta_{sc} = \Delta\theta = 2 \cdot \arcsin(d/2f) = 0.0032 \text{ rad.}$$

按参考文献[6]中波导弯曲半径的取值,最小弯曲半径为: $r_{\min} = 3600 \mu\text{m}$,相应的损耗预计为 $0.3 \text{ dB/cm}^{[10]}$ 。

假设,标准化的接口参量为: $\Delta W = 0.25 \text{ mm}$; $l_{\min} = 2 \text{ mm}$ 。根据 r_{\min} 和输入/输出波导间距 ΔW 及其最小直波导长度 l_{\min} ,按前一节的设计方法,计算出阵列波导、输入/输出波导的结构参量如表2所示。

表 2 聚合物 AWG 的几何结构参量

r_{\min} (最小弯曲半径)	3.6 mm
θ_0 (中心波导倾角)	1.2160 rad
L_{zl} (两个块波导焦点距离的 1/2)	7.1510 mm
ΔW (接口处输入/输出波导间距)	0.25 mm
l_{\min} (接口处输入/输出波导的最短直波导长度)	2.0 mm
W_0 (接口处垂直方向上波导与焦点的最小距离)	2.2955 mm
Δl_1 (接口处相邻直波导长度差, $\Delta l_1 \geq 0.0719 \text{ mm}$)	0.0675 mm
L_{sc} (焦点到相连的输入输出波导接口端面的距离)	6.1737 mm

按几何结构参量优化设计后的 AWG 如图 4 所示,器件的面积为 $2.665 \times 1.73 \text{ cm}^2$,原设计面积^[6]为 $3.20 \times 1.64 \text{ cm}^2$,显然,器件的面积明显减小了。

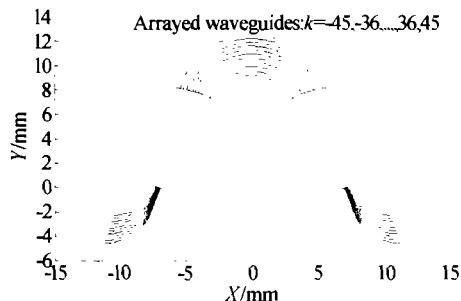


图 4 阵列波导光栅(AWG)结构

Fig. 4 Schematic waveguide layout of the AWG satisfied the parameters in table 1, 2

4 结论

在 AWG 的结构设计中,需要确定的基本参量

数目大于基本方程的数目,在满足技术参量的条件下,如何确定所有基本参量,目前还没有相关的报道。本文通过分析阵列波导各参量之间的关系,提出了优化选择阵列波导参量的途径。对于输入/输出波导,本文提出,输入/输出波导接口端的间距 ΔW 和输入/输出接口端最短的直波导长度 l_{\min} 应设为标准化的基本参量。然后,通过分析输入/输出波导各参量之间的关系,从如何使结构更紧凑的角度,提出了两个新的约束方程,加上由几何关系建立的方程,就能优化并完全确定其它输入/输出波导的结构参量。因此,本文建立了能获得结构紧凑的 AWG 的优化设计方法,而且,用此设计方法,选取不同输入/输出接口参量、波导最小弯曲半径,和约束方程 1、2 式中取不同的数值,也很容易设计出不同结构的 AWG。因此,本文提出的优化设计方法,对设计和制作 AWG,有重要的参考价值。

参考文献

- 1 Smit M K, Van Dam C. Phase-based WDM-devices: principles, design and applications. *IEEE J Select Topics in Quantum Electron*, 1996, 2(2): 236 ~ 250
- 2 Parker M C, Walker S D. Design of arrayed-waveguide grating using hybrid Fourier-Fresnel transform techniques. *IEEE J Select Topics in Quantum Electronics*, 1999, 5(5): 1379 ~ 1384
- 3 Kamalakis T, Sphicopoulos T. An efficient technique for the design of an arrayed-waveguide grating with flat spectral response. *J Lightwave Technol*, 2001, 19(11): 1716-1725
- 4 Shaari S, Kien M S. Design implementation of up to 20 channel silica-based arrayed waveguide WDM. ICSE2000 Proceedings, 2000, Nov. 235 ~ 240
- 5 Muñoz P, Pastor D, Capmany J. Modeling and design of arrayed waveguide grating. *J Lightwave Technol*, 2002, 20(4): 661 ~ 674
- 6 Gao W B, Ma C S, Zhang D M, et al. Parameter optimization and structural design of polymer arrayed waveguide grating multiplexer. *Optics Communications*, 2002, 201: 45 ~ 53
- 7 Viens J F, Callender C L, Noad J P, et al. Compact wide-band polymer wavelength-division multiplexers. *IEEE Photonics Technology Lett*, 2000, 12(8): 1010 ~ 1012
- 8 Kasahara R, Yanagisawa M, Sugita A, et al. A compact optical wavelength selector composed of arrayed-waveguide gratings and an optical Gate array integrated on a single PLC platform. *IEEE Photonics Technology Lett*, 2000, 12(1): 34 ~ 36
- 9 Hida Y, Hibino Y, Itoh M. Fabrication of low-loss and polarisation-insensitive 256 channel arrayed-waveguide grating with 25 GHz spacing using 1.5% Delta waveguides. *Electron Lett*, 2000, 36(9): 820 ~ 821

10 张小康,廖常俊,刘颂豪. 波导弯曲半径与弯曲损耗的关系. 光子学报,2004,33(2):147~150

Zhang X K, Liao C J, Liu S H. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2):147~150

Compact Structural Design of Arrayed Waveguide Grating

Zhang Xiaokang^{1,2}, Liao Changjun², Liu Songhao²


¹ Applied Physics Dept., South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640

² The Research Institute of Quantum Electronics, South China Normal Univ., Guangzhou 516031

Received date:2002-09-25

Abstract It is very important that the larger number of channels of AWG can be obtained on a definite wafer. The compact design of AWG presented in this paper was based on two restricting equations and optimizing the distant between the two focuses of AWG through analyzing the inclination of central waveguide. A design method was proposed, by which the rest structure parameters can be exactly determined with the minimum bending radius of waveguides, pitch of adjacent input/output waveguides, and a desired compact AWG can be obtained. An example was presented at last.

Keywords AWG; Restricting equations of structure; Structure parameters; Optimized design; Minimum bending radius; Interface parameters



Zhang Xiaokang received her B. S. degree from optics department of Shandong University in 1982, and her M. S. degree from physics department of Hunan Normal University in 1990. She is an associate professor in applied physics department of South China University of Technology. Now, She is pursuing her Ph. D. in the Research Institute of Quantum Electronics of South China Normal University.