

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02B 6/26 (2006.01)

G02B 6/28 (2006.01)



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200610068055.1

[43] 公开日 2006年9月27日

[11] 公开号 CN 1837873A

[22] 申请日 2006.3.24

[21] 申请号 200610068055.1

[30] 优先权

[32] 2005.3.25 [33] US [31] 11/089,640

[71] 申请人 朗迅科技公司

地址 美国新泽西州

[72] 发明人 克里斯托弗·R·道伊尔

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商
标事务所
代理人 李镇江

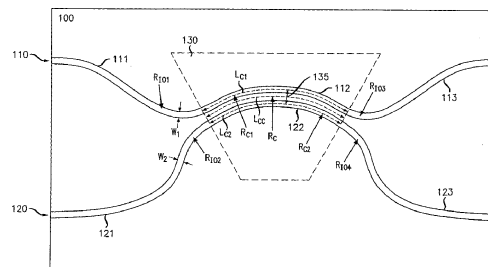
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 4 页

[54] 发明名称

光耦合器装置和方法

[57] 摘要

一种包括具有弯曲耦合部分的第一和第二波导的平面光波电路耦合器，该弯曲耦合部分的曲率半径被选择为使得该耦合器的分束比基本对波长和极化不敏感。



- 1、一种平面光波电路 (PLC) 耦合器, 该耦合器包括:
包括具有有限的曲率半径 R_{c1} 的弯曲耦合部分的第一波导; 以及
包括具有有限的曲率半径 R_{c2} 的弯曲耦合部分的第二波导, 该第二波导的耦合部分可操作地耦合到该第一波导的耦合部分, 从而光可在该第一和第二波导之间耦合;
其中该第一和第二波导的传播常数基本相同; 以及
其中该耦合器的分束比基本对波长和极化不敏感。
- 2、根据权利要求 1 的耦合器, 其特征在于, 所述耦合器的分束比在围绕预期中心波长的大约 100nm 的频率范围内的变化小于约 10%。
- 3、根据权利要求 1 的耦合器, 其特征在于, 所述第一波导的宽度 (w_1) 和所述第二波导的宽度 (w_2) 被选择为使得每个波导内的基本模具有最小宽度。
- 4、根据权利要求 1 的耦合器, 其特征在于, 其中 R_{c1} 和 R_{c2} 在它们各自的弯曲耦合部分上恒定。
- 5、根据权利要求 1 的耦合器, 其特征在于, 其中所述第一和第二波导的输入和输出部分具有基本最小的曲率半径而不会导致严重的弯曲辐射损失。
- 6、根据权利要求 1 的耦合器, 其特征在于, 其中 R_{c1} 和 R_{c2} 被选择为使得 PLC 耦合器的最大可能分束比等于预期的分束比。
- 7、根据权利要求 6 的耦合器, 其特征在于, 其中所述第一和第二波导的耦合部分的长度 (L_{c1} , L_{c2}) 被选择为使得所述耦合器在预期波长范围内显示最大分束比。
- 8、根据权利要求 1 的耦合器, 其特征在于, R_{c1} 和 R_{c2} 在所述第一和第二波导的耦合部分的长度 (L_{c1} , L_{c2}) 上变化, 从而可实现该耦合器的预期的功率分配敏感性和预期的相位敏感性。
- 9、一种用于制造用于光耦合的平面光波电路 (PLC) 的方法,

该方法包括以下步骤：

在 PLC 上形成第一波导和第二波导，该第一波导和第二波导分别包括具有有限的曲率半径 R_{c1} 和有限的曲率半径 R_{c2} 的弯曲耦合部分；

其中该第一和第二波导的传播常数基本相同；并且 R_{c1} 和 R_{c2} 被选择为使得该耦合器可显示预期的分束比，以及

其中该耦合器的分束比基本对波长和极化不敏感。

光耦合器装置和方法

技术领域

本发明一般涉及用于耦合光信号的方法和装置，并更特别地涉及具有改进的波长和极化敏感性的平面光波电路（PLC）耦合器。

背景技术

光耦合器用于各种平面光波电路（PLC），这些电路包括例如基于 Mach-Zehnder 干涉仪（MZI）的开关、基于 MZI 的滤波器、分接头等。损耗最小的 2×2 耦合器是定向（directional）耦合器（如图 1（a）所示，也被称为渐消失（evanescent）耦合器），其包括紧密设置的两个波导以允许波导之间的光耦合。但是，传统定向耦合器的分束比对 1）通过耦合器传播的光的波长、2）这样的光的偏振和 3）在制造期间发生的 PLC 耦合器结构（例如波导长度）的变化（下文被统称为波长、极化和制造（WPF）分配（split）敏感性）非常敏感。

存在三种主要的减小 2×2 耦合器的 WPF 分配敏感性的方法：1）耦合到外部模（即使两个输入模耦合到耦合器内的许多模，并然后耦合回两个输出模）、2）使耦合器不对称或 3）使用多个部分。

多模干涉（MMI）耦合器（图 1（b）中所示）是用于耦合到外部模的设备的一个示例。此耦合器在耦合区域内激励多余两个的模。模的数量的增加会减小对 WPF 变化的分配敏感性，这是因为不确定性在多个模之间是平均的。但是，MMI 耦合器通常显示不希望的额外损耗，并且对在 PLC 制造期间发生的波导宽度变化敏感。多模耦合器的另一个示例是星形耦合器（图 1（c）内所示）。但是，与 MMI 耦合器类似， 2×2 星形耦合器通常显示高额外损耗。

不对称耦合器（图 1（d）内所示）是具有两个耦合的不同宽度的波导的定向耦合器。在定向耦合器内，随着耦合器长度变化，分束

比在 0% 和一些值 (R) 之间正弦变化 (见图 4)。在对称耦合器内 R 为 100%。在不对称耦合器内 R 小于 100% (因为当耦合器长度增加时, 在 100% 的光可被耦合入之前, 不对称本质使已经耦合的光与最近耦合入的光异相)。不对称耦合器通常被设计成使得 R 为预期的分束比, 并且耦合器长度被选择为使得实现的分束比接近正弦波的峰顶 (见图 4)。因此, 消除了耦合比对长度的一阶依赖性。但是, 不对称耦合器对可在 PLC 制造期间发生的波导宽度偏离预期宽度的变化非常敏感。

不对称耦合器的另一个示例是“绝热 (adiabatic) 耦合器” (如图 1 (e) 中所示)。绝热耦合器的波导在耦合区域的一端是不对称的而在另一端是对称的。这些耦合器的工作原理是耦合器逐渐从对称变化到不对称, 从而在对称端处的局部波导结构的两个固有模态 (eigenmode) 中的每一个很好地转变到在不对称端处的局部波导结构的两个固有模态中的每一个。但是, 绝热耦合器相当长, 从而设备尺寸和成本增加。

最后, 多部分耦合器 (例如, 图 1 (f) 内所示的两部分耦合器) 包括通过具有小路径长度差的波导相连接的两个或多个定向耦合器。小路径长度差被选择为使得定向耦合器的 WPF 依赖性 (或敏感性) 部分地相互抵消。已提出和说明双耦合器、三耦合器、和四耦合器多部分耦合器。但是, 这些多部分耦合器非常长, 从而设备尺寸和成本增加。

发明内容

本发明提供了一种具有改进的波长、极化和制造敏感性的用于耦合光信号的 PLC 耦合器装置。具有以弯曲构型设置的波导的根据本发明的 PLC 耦合器可使耦合器具有最大可能分束比, 当改变波长、极化或制造时, 该分束比小于 100%。通过使此最大可能分束比等于预期的分束比并设置耦合器长度使得在所关心的参数 (例如耦合器的中心波长) 等于预期的参数时实际分束比等于预期分束比, 可消除分

束比对该所关心的参数的一阶依赖性。

另外，耦合器的两个波导可能窄，这允许波导的宽度为最小模宽度，使得该耦合器与传统不对称耦合器相比对波导宽度变化更不敏感。此外，使两个波导窄可增加耦合强度，允许耦合器比传统不对称耦合器短，从而减小 PLC 制造成本。

在一个优选实施例内，提供了基本对波长和极化不敏感的 PLC 耦合器。该 PLC 耦合器包括第一波导和第二波导，该第一波导包括曲率半径为 R_{c1} 的弯曲耦合部分，该第二波导包括曲率半径为 R_{c2} 的弯曲耦合部分。该第二波导的耦合部分可操作地耦合到该第一波导的耦合部分，从而光可在该第一和第二波导之间耦合。

附图说明

在结合附图阅读时可更好地理解前文概述以及下面对本发明的优选实施例的详细说明。为了说明本发明，在附图中示出当前优选实施例。但是，应理解本发明并不局限于所示的精确设置和工具。

在附图中：

图 1 (a) - (f) 示出现有技术的耦合器；

图 2 示出根据本发明的一个实施例的 PLC 耦合器；

图 3 (a) - (b) 是示出直耦合器和根据本发明的实施例的 PLC 耦合器的被测量的透射比对比于波长的曲线；

图 3 (c) 是示出直耦合器和根据本发明的实施例的 PLC 耦合器的分束比对比于波长的曲线；

图 4 是图示出对称和不对称耦合器的分束比对比于耦合器长度的曲线。

具体实施方式

图 2 是根据本发明的 PLC 耦合器 100 的一个实施例的图示。PLC 耦合器 100 优选地包括第一波导 110 和第二波导 120。该第一和第二波导 110、120 中的每一个分别包括输入部分 111、121，在耦合区域

130 内的弯曲耦合部分 112、122，和输出部分 113、123。

第一和第二波导的输入和输出部分 111、121、113、123 优选地具有曲率半径 R_{i01} 、 R_{i02} 、 R_{i03} 、 R_{i04} （或“弯曲半径”），该曲率半径基本是在可能的条件下最小的而不会产生很大的弯曲辐射损耗以使对来自输入/输出波导 111、121、113、123 的耦合的贡献最小。

第一和第二波导 110、120 的弯曲耦合部分 112、122 在耦合区域 130 内操作地耦合（例如紧密地放置），从而第一或第二波导 110、120 内的光在波导 110、120 之间耦合。弯曲耦合部分 112、122 分别具有曲率半径 R_{c1} 和 R_{c2} 。 R_{c1} 和 R_{c2} 优选地被选择为使得 PLC 耦合器 100 的最大可能分束比等于预期的分束比。第一和第二波导 110、120 的耦合部分 112、122 的长度为 L_{c1} 、 L_{c2} 。 L_{c1} 和 L_{c2} 优选地被选择为使得 PLC 耦合器 100 在预期的波长范围内显示最大分束比。

当 R_{c1} 和 R_{c2} 是有限的时，从例如第一波导 110 耦合到第二波导 120 的光行进的距离与仅在第一波导 110 内行进的光（即未耦合光）行进的距离不同。这导致在 100% 的光耦合之前，稍后耦合到第二波导 120 内的光在耦合区域内与以前耦合的光异相。光的异相耦合会导致相消干涉，从而防止发生额外的耦合。因此，不管耦合器长度或波长如何，在 R_{c1} 和 R_{c2} 是有限的时的最大可能分束比总是小于 100%。

在第一和第二波导 110、120 的耦合部分 112、122 之间形成具有预期宽度的间隙 135（ R_c 是在耦合部分内的间隙 135 内延伸的中心线的曲率半径）。优选地，间隙 135 的宽度被选择为可在 PLC 上形成的而不会产生严重的制造困难（例如，在蚀刻第一和第二波导 110、120 时不对称）的最小间隙。本领域内的技术人员应理解，较小间隙 135 会产生较强耦合，这允许具有较小波长依赖性的较短耦合器。

第一和第二波导 110、120 的传播常数优选地基本相同。PLC 耦合器 100 的分束比基本对波长和极化不敏感。PLC 耦合器 100 的分束比优选地在围绕预期中心频率的 $\sim 200\text{nm}$ 的频率范围内变化小于 $\sim 10\%$ 。

第一波导 110 的宽度 (w_1) 和第二波导 120 的宽度 (w_2) 优选地

被选择为大约最小模宽度（即，波导中的基模具有最小宽度的位置）。这样的最小模宽度提供了改进的对波导宽度变化的不敏感。假设已知直耦合器的耦合区域的长度 L ，则可得到用于计算 R_c （和对应的 R_{c1} 和 R_{c2} ）和 L_c 公式（如图 2 所示， R_c 和 L_c 分别是在耦合区域 130 内的耦合波导之间的间隙的中心线的曲率半径和长度）。以模耦合公式开始：

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 + \kappa_{12} a_2 \quad \text{和} \quad \frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 + \kappa_{12} a_1 \quad (1)$$

其中 a_i 是波导 i 内的场而 β_i 是波导 i 内的有效传播常数， κ_{12} 和 κ_{21} 是耦合系数，且 j 是 -1 的平方根。我们用有效传播常数来指将沿在波导之间的间隙的中心线的距离 z 作为参考系的传播常数。假设 $|\kappa| \ll |\beta|$ ——这是传统定向耦合器的情况，这些公式是有效的。

如果我们这样开始，即在第一波导（波导 1）内为零场而在第二波导（波导 2）内为具有幅值为 $a_2(0)$ 的场，则 a_1 的解为：

$$a_1(z) = \frac{\kappa_{12}}{\beta_0} a_2(0) \sin(\beta_0 z) \exp\left(-j \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} z\right), \quad \text{其中} \quad \beta_0 = \sqrt{\left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2}\right)^2 + |\kappa_{12}|^2} \quad (2)$$

如果 $L_{s,full}$ 是直的完整（full）耦合器（100/0 耦合器）的 L_s ，则然后假设与弯曲耦合器相比 κ 未改变，则可从等式（2）发现：

$$L_c = \sqrt{C} L_{s,full}, \quad \text{且} \quad R_c = \frac{2sn}{\lambda} L_{s,full} \sqrt{\frac{C}{1-C}} \quad (3)$$

其中 C 是预期的分束比， s 是在耦合区域内的波导之间的中心到中心的间隔， n 是折射率，而 λ 是真空波长。例如，对于 50/50 耦合器， $C = 0.5$ 。因此，如果能够对直的 100/0 耦合器的长度作出合理良好估计，可使用等式（3）来近似地确定根据本发明的实施例的弯曲 PLC 耦合器的结构，以提供具有分束比 C 的 WPF 不敏感耦合器。本领域内的技术人员应理解，可使用对 L_c 和 R_c 的小修改（通过直接仿真或实验获得）来在预期的波长 λ 处更精确地实现预期的分束比 C 。

应指出，上述计算中并不包括来自耦合器输入和输出部分（例如 111、121、113、123）的贡献。本领域内的技术人员应理解，尽管这些贡献非常巨大（例如总共贡献在典型的直 50/50 耦合器内的总耦合的 ~37%），但是因为当导出等式（3）时对于根据本发明的直和弯曲

耦合器都忽略了这些贡献，所以等式(3)可足够准确地用作初始设计指南。例如，如果建立直的50/50耦合器的设计，则利用 $L_s = 500\mu\text{m}$ ，可确定50/50弯曲耦合器的设计。首先，估计100/0直耦合器的直长度，其是 $\sim (2 - 0.37) / (1 - 0.37) \times 500\mu\text{m} = 1300\mu\text{m}$ 。然后使用等式(3)， $L_c = 919\mu\text{m}$ 。还可使用直耦合器的 s 从(3)计算 R_c 。

构造具有0.80%系数对比度和 $6.0\mu\text{m}$ 核心高度的硅上二氧化硅波导的实验50/50耦合器以测试本发明的方面。实现传统的直定向耦合器，其波导宽度 $= 4.3\mu\text{m}$ ，间隙 $= 3.95\mu\text{m}$ 、 $R_{i0} = 10\text{mm}$ 和 $L_s = 620\mu\text{m}$ 。紧邻该传统的直定向耦合器实现根据本发明的实施例的弯曲PLC耦合器，该耦合器的波导宽度 $= 4.3\mu\text{m}$ ，间隙 $= 3.9\mu\text{m}$ 、 $R_{i0} = 10\text{mm}$ 、 $R_c = 27\text{mm}$ 和 $L_s = 1178\mu\text{m}$ 。如果在计算总的耦合器长度时包含波导完全没有耦合的输入和输出波导部分的部分（例如，隔开 $\sim 19\mu\text{m}$ ，在输入/输出波导的每一个侧上的总长度为 $320\mu\text{m}$ ），则然后弯曲PLC耦合器的总长度仅是直耦合器的总长度的1.4倍。

图3(a) - 3(b)分别示出在C和L频带上的直耦合器和根据本发明的弯曲PLC耦合器的横向电(TE)和横向磁(TM)极化的测量的透射比对比于波长的曲线。所测量的损耗为光纤间损耗。本领域的技术人员应理解，与直耦合器相比，弯曲PLC耦合器对波长和极化的敏感性小得多且没有额外损耗。图3(c)示出在C和L频带上的直耦合器和根据本发明的弯曲PLC耦合器的测量的分束比对比于波长的曲线。在C和L频带上，直耦合器的分束比变化 $\sim 20\%$ ，而弯曲PLC耦合器的分束比变化小于 $\sim 5\%$ 。

还进行仿真以确定根据本发明的实施例的弯曲PLC耦合器的制造敏感性。使用2维波束传播，将弯曲PLC耦合器与直的不对称耦合器相比较（使用上文给定的相同的参数），一个波导的宽为 $4.3\mu\text{m}$ 而另一个波导的宽为 $5.1\mu\text{m}$ 。 $L_s = 1000\mu\text{m}$ 。这两个耦合器被设计和验证为在 $\lambda = 620\mu\text{m}$ 时波长不敏感。在每一侧上将所有波导宽度减小 $0.3\mu\text{m}$ ，使弯曲PLC耦合器的耦合比从50/50变化为48/52，而直的不对称耦合器的耦合比从50/50变化到28/72。在另一个仿真中，可证

实当耦合区域 130 内的波导之间的中心到中心的间隔减少时，弯曲 PLC 耦合器的波长敏感性更平坦。

应理解，不敏感耦合器的一个潜在的缺陷是当用单个输入激励耦合器时，分束比 WPF 敏感性的减小会导致输出信号之间的相位差内的 WPF 敏感性增加。进行计算以研究分配敏感性和相位差敏感性之间的关系。

单部分耦合器的操作可由矩阵 $R^{-1}(\theta_1)P(\phi)R(\theta_2)$ 描述，其中 R 和 P 是：

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & j\sin\theta \\ j\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{且} \quad P(\phi) = \begin{bmatrix} \exp\left(-j\frac{\phi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(j\frac{\phi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

θ 为耦合器的两个固有模式的分束比，而 ϕ 为耦合器的两个固有模式之间的相位差。假设 WPF 变化导致 ϕ 出现误差从而 ϕ 变为 $\phi(1 + \varepsilon)$ 而 θ 无误差。 $\varepsilon \ll 1$ 。这对于传统的直耦合器和根据本发明的弯曲耦合器是合理的，这是因为 WPF 变化主要影响耦合器固有模式传播常数而不会改变固有模式形状。

下表示出可给出 50/50 的分束比和产生的分束比和端口之间的相位差中的误差的 θ_1 、 ϕ 和 θ_2 的四个不同的选择。

名称	θ_1	ϕ	θ_2	功率分配 误差	从左侧的 相位误差	从右侧的 相位误差
传统的直耦合器	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}\varepsilon$	0	0
曲率恒定	$\frac{\pi}{8}$	π	$\frac{\pi}{8}$	$1.2\varepsilon^2$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{2}\varepsilon$	$\frac{\sqrt{2}\pi}{2}\varepsilon$
曲率中有小变化	$\frac{\pi}{5}$	π	$\frac{\pi}{20}$	$0.7\varepsilon^2$	$0.31\pi\varepsilon$	$0.95\pi\varepsilon$
曲率中有小变化 (绝热耦合器)	$\frac{\pi}{4}$	$\gg \pi$	0	0	0	$\gg \pi\varepsilon$

本领域的技术人员应从该表中理解，功率分配误差越低则最差情况的相位误差越高。例如，传统直耦合器具有最差的分配敏感性但是相位误差为零，而曲率具有很大变化的弯曲耦合器（即绝热耦合器）理论上具有零功率分配误差，但是在耦合器的一端具有非常大的相位

误差。

相位敏感性的增加会导致一些设备中的问题。例如，使用根据本发明的实施例的弯曲 PLC 耦合器的 MZI 开关可具有驱动非常 WPF 敏感的相位的开关状态。此问题的一个解决方案是在 MZI 内使用朝向相反的两个根据本发明的实施例的弯曲 PLC 耦合器。假设两个弯曲 PLC 耦合器的环境和设计相同，则一个耦合器内的任何相位变化都会被另一个耦合器的相位变化抵消。

本领域内的技术人员应理解， R_{c1} 和 R_{c2} 可在第一和第二波导 110、120 的耦合部分的长度 (L_{c1} 和 L_{c2}) 上改变。通过改变 R_{c1} 和 R_{c2} ，可实现该耦合器的预期的功率分配敏感性和预期的相位敏感性。例如，对于 R_{c1} 和 R_{c2} 内存在小变化的耦合器（上表的第三行）， R_{c1} 和 R_{c2} 优选地逐渐改变（例如单调减少或上升）。对于 R_{c1} 和 R_{c2} 内存在大变化的耦合器（上表的第四行）， R_{c1} 和 R_{c2} 优选地从耦合部分 130 的一端到另一端从无限值变为有限值（或反之亦然）。

本领域的技术人员应理解，可改变上述实施例而不会背离本发明的宽的发明构思。因此，应理解本发明并不局限于所公开的具体实施例，而将覆盖在由所附权利要求限定的本发明的精神和范围内的修改。

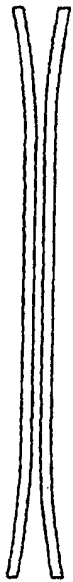


图 1A



图 1B

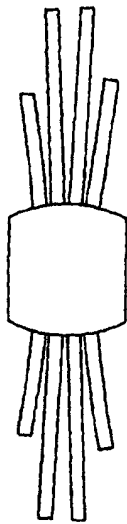


图 1C



图 1D



图 1E



图 1F

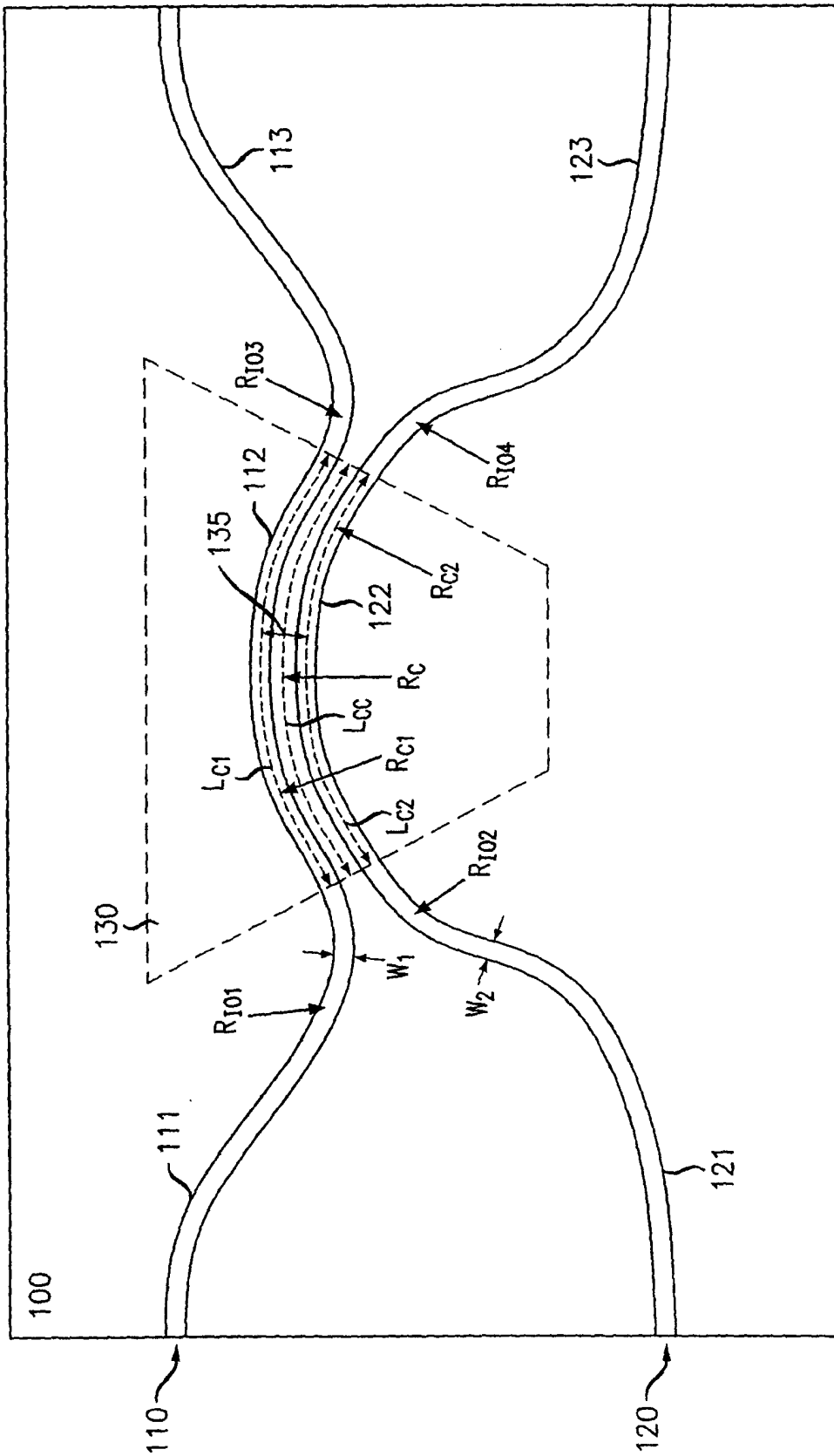


图 2

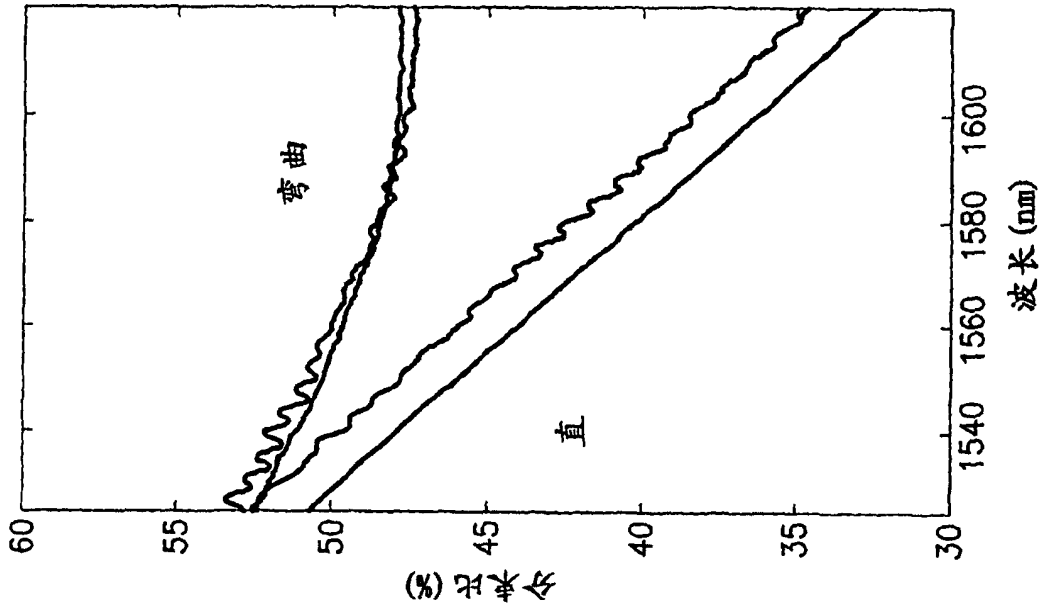


图 3C

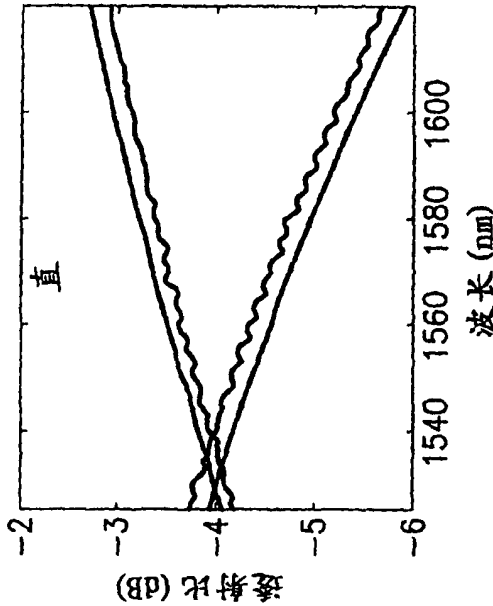


图 3A

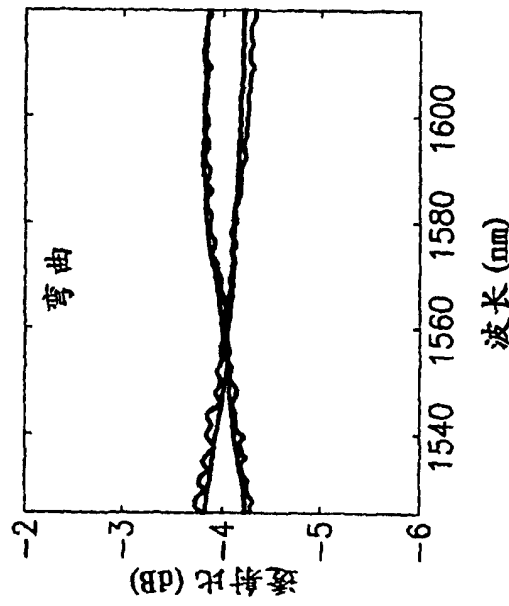


图 3B

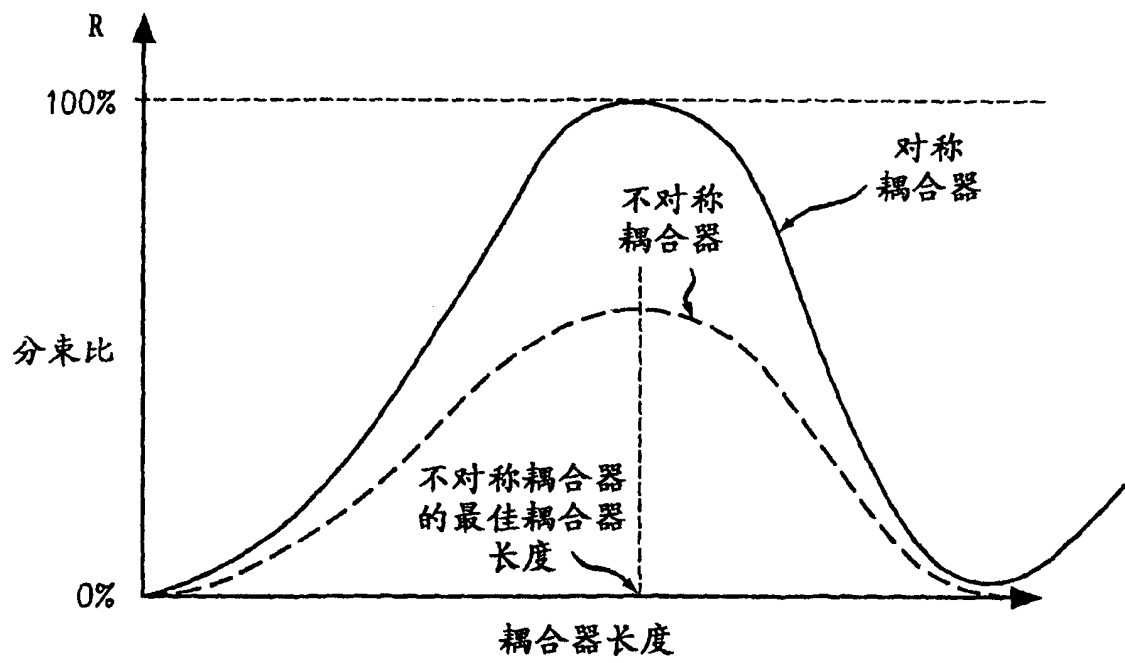


图 4