

垂直耦合结构纳米微环谐振器工艺失准分析

乐孜纯¹ 李锐¹ 胡劲华¹ 董文²

¹ 浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023
² 浙江工业大学生物与环境工程学院, 浙江 杭州 310014

摘要 垂直耦合结构纳米微环谐振器是光子集成电路的重要组成部分。主要研究了与其实际制作相关的工艺失准问题。针对高折射率差波导材料垂直耦合结构纳米微环谐振器,先用耦合模理论解析方法研究了耦合系数与直波导和微环波导耦合层厚度 d 以及横向偏移量 Δ 之间的关系,为三维时域有限差分法(3D-FDTD)的精确数值计算确定了模拟范围。之后结合解析方法和3D-FDTD数值计算研究了 Δ 和 d 的制作工艺容差。研究发现,当 $d=30$ nm,偏移量 Δ 在130~265 nm之间变化时,耦合系数始终保持在较高值,为垂直耦合结构纳米微环谐振器的工艺制造提供了很大容差,对其实际制作较有意义。

关键词 集成光学;微环谐振器;垂直耦合;工艺容差;耦合模理论;时域有限差分法

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1213001

Vertical Nano-Microring Resonators with Enhanced Tolerance to Fabrication Misalignments

Le Zichun¹ Li Rui¹ Hu Jinhua¹ Dong Wen²

¹ College of Sciences, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China
² College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310014, China

Abstract Microring resonators are key components in nowadays photonic integrated circuits. A vertical microring resonator with enhanced tolerance to fabrication misalignments is introduced. Both straight and microring waveguides are with relatively high refractive-index difference between the core and cladding, therefore the vertical microring resonator is compact and confines the power efficiently. Based on coupling mode theory, the coupling coefficient is derived as a function of the coupling layer thickness (d) and the transverse offset (Δ) between the straight and microring waveguides. The analytic solutions are used to confine the range of three-dimensional finite-difference time-domain (3D-FDTD) simulations for their efficiency. In addition, the tolerance of d and Δ is studied by taking consideration of actual fabrication technology for the vertical nano-microring resonator. The analytic solutions and simulation results show that when $d=30$ nm, the vertical microring resonator has a large coupling coefficient even Δ is varied from 130 to 265 nm. It is verified that the vertical nano-microring resonator has enhanced tolerance to fabrication misalignments.

Key words integrated optics; microring resonator; vertical coupling; fabrication tolerance; coupling mode theory; finite-difference time-domain method

OCIS codes 130.3120; 230.7370; 230.5750

1 引言

微环谐振器^[1](MRR)微米甚至纳米量级的结构尺寸使其非常适合用于大规模光子集成电路

(PIC)的单片密集集成,同时在研制滤波器^[2-3]、光开关^[4]、调制器^[5]、激光器^[6]和缓存器^[7~9]等集成型有/无源光电子器件中有广泛的应用前景。MRR

收稿日期: 2011-05-23; 收到修改稿日期: 2011-07-01

基金项目: 浙江省自然科学基金(R107377, Y1080172)资助课题。

作者简介: 乐孜纯(1965—),女,博士,教授,主要从事微结构光电子器件和光通信网络技术等方面的研究。

E-mail: lzc@zjut.edu.cn

有两种基本结构:侧面耦合结构^[3]和垂直耦合结构^[10],已见报道的研究大多集中在侧面耦合结构 MRR 上。通常对于 MRR 结构性能优良与否的评判,关键在于其是否更易于控制耦合效率^[11]。与侧面耦合相比,垂直耦合结构 MRR 有很多优点^[12]: 1)垂直耦合结构 MRR 的直波导和微环之间的耦合区通过薄膜沉积厚度来控制,不像侧面耦合结构 MRR 通过控制蚀刻尺寸来形成,因此更易于制作实现。2)垂直耦合结构 MRR 可以优化直波导和微环之间的横向位置偏移(Δ)和耦合层厚度(d)两个参量来控制其耦合系数,因此更易于优化制作容差。3)垂直耦合结构 MRR 中直波导和微环间的耦合区可以更大,有利于提高耦合效率。

目前对垂直耦合结构 MRR 的研究主要集中在微米量级微环的理论分析^[13]、性能模拟^[14~16]以及基于微环的新型结构器件的设计制作方面^[17],而对于微环制作工艺容差对其性能影响方面的研究很少。在微环实际制作中,工艺失准是不可避免的,并会对制成的 MRR 的性能产生巨大影响,微环工艺容差越小,工艺失准的影响越大。因此在 MRR,特别是纳米 MRR 的设计中研究并考虑其工艺容差,以指导 MRR 的实际制作非常重要,直接影响着 MRR 在光子集成电路中的实际应用。

本文针对硅基纳米波导构成的垂直耦合结构 MRR 开展研究,该垂直耦合结构 MRR 的波导芯区和包层的折射率差很大,具有易于将光约束在芯区、微环尺寸小、与目前标准 COMS 工艺兼容等优点。但是这样的 MRR 结构和材料不满足弱导条件,因此本文首先参考基于耦合模理论(CMT)的分析方法^[13],进一步推导得出垂直耦合结构 MRR 的耦合系数与垂直耦合层厚度 d 以及直波导和微环之间的横向位置偏移量 Δ 之间关系的解析式,并基于此给出垂直耦合结构 MRR 的粗略物理意义的解析。之后通过与三维时域有限差分(3D-FDTD)模拟方法的比较研究,得出理论方法的误差及其有效范围。最后将解析方法和 FDTD 模拟方法相结合,先进行解析求解,得出初步的优化工艺参数并大幅度缩小 FDTD 模拟范围,基于此深入研究垂直耦合结构纳米 MRR 的工艺失准特性,最终得出垂直耦合结构纳米 MRR 的最优结构和工艺参数。

2 垂直耦合结构纳米 MRR 的结构

本文所研究的垂直耦合结构纳米 MRR 如图 1 所示,由掩埋于包层的直波导和一个半径为 $5 \mu\text{m}$ (根

据微环谐振方程优化得到)的微环波导构成,直波导和微环波导的波导芯区截面尺寸及折射率分布完全相同。芯区横截面为宽 $a=350 \text{ nm}$ 、高 $b=300 \text{ nm}$ 的矩形;波导芯区与包层分别选择硅和氧化硅材料,波导芯区折射率 $n_1=3.48$ 、包层折射率 $n_2=1.46$;直波导和微环波导位于不同层,层间间隔为 d (即垂直耦合区的厚度),直波导和微环波导之间的横向位置偏移量为 Δ 。工艺上可以通过控制直波导与微环波导的偏移量 Δ 和耦合层厚度 d 来获得优化的耦合系数。其特点在于芯区采用矩形硅材料纳米波导,与目前标准 CMOS 工艺兼容。另外波导芯区与包层折射率差很大,使得微环的半径仅有几微米,尺寸小、性能好,适合用于大规模光子集成电路^[18]。对光通信典型工作波长 1550 nm ,用全矢量有限元法(FVFEM)^[19]模拟计算波导的 E_{00}^x 模,可见该垂直耦合结构纳米 MRR 的直波导和微环波导支持 E_{00}^x 模的单模传输(如图 2 所示),可在光通信网络中用于实现滤波、复用/解复用、光分插复用等功能。

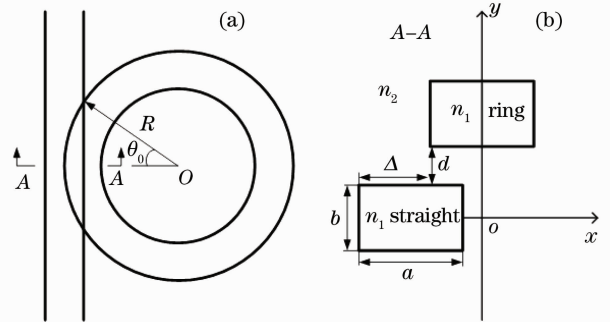


图 1 (a)垂直耦合结构纳米 MRR 示意图;(b)直波导和微环波导结构和折射率分布

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the vertical coupling nano-microring resonator; (b) structure and refractive-index profiles of straight and microring waveguides

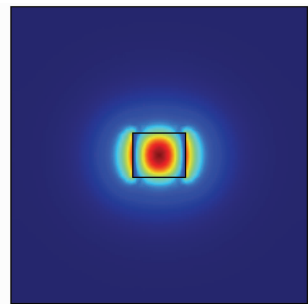


图 2 工作波长为 1550 nm 时,波导中传输的 E_{00}^x 模
Fig. 2 E_{00}^x mode in waveguides at 1550 nm wavelength

3 耦合模理论分析直波导与微环波导的垂直耦合

3.1 基于耦合模理论求解直波导与微环波导的耦合系数

对于任何 MMR 结构,耦合系数都是一个非常重要的设计参数。微环与直波导之间的耦合一般仅作用在两个波导完全重合叠加的区域。对于这种情况,其耦合系数等效于两个分开相同距离平行直波导的耦合系数,因此,在计算耦合系数时,可将微环

波导近似为直波导。定义 $z=0, \Delta=0$ 时的耦合系数为 κ_0 ,根据耦合模理论^[20], κ_0 可由下式来计算:

$$\kappa_0 = \frac{\omega \epsilon_0}{4} (n_1^2 - n_2^2) \iint_s E_r^*(x, y) E_s(x, y) dx dy, \quad (1)$$

式中 ω 为角频率, ϵ_0 为真空中的介电常数,积分域 s 取直波导在 $z=0, \Delta=0$ 时的截面积, $E_s(x, y)$, $E_r(x, y)$ 分别为直波导和微环波导的场分布函数。令直波导和微环波导电场 x 分量分别为 $E_{sx}(x, y) = E_{sx}(x)E_{sx}(y)$ 和 $E_{rx}(x, y) = E_{rx}(x)E_{rx}(y)$, 得出

$$\kappa_0 = \frac{\omega \epsilon_0}{4} (n_1^2 - n_2^2) \iint_s E_{rx}^*(x, y) E_{sx}(x, y) dx dy = \frac{\omega \epsilon_0}{4} (n_1^2 - n_2^2) \int_{-b/2}^{b/2} E_{rx}^*(y) E_{sx}(y) dy \int_{-a/2}^{a/2} E_{rx}^*(x) E_{sx}(x) dx. \quad (2)$$

接下来,计算 E_{pq}^x 导模的 κ_0 ,其中 p 和 q 标示模式的阶数。将微环波导近似成直波导,并利用其场分布函数^[21],解得

$$\kappa_0 = [2Ak_{1y}^2 k_{2y}^2 / \beta_{TE} (k_{1y}^2 + k_{2y}^2) (2 + k_{2y}b)] \times \exp(-k_{2y}d), \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} A = \frac{a + 2n_1^2 n_2^2 k_{2x}^2 / [k_{2x} (n_2^4 k_{1x}^2 + n_1^4 k_{2x}^2)]}{a + 2n_1^2 n_2^2 (k_{1x}^2 + k_{2x}^2) / [k_{2x} (n_2^4 k_{1x}^2 + n_1^4 k_{2x}^2)]} \\ k_{2y}^2 = k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_2^2 - k_{1y}^2 \\ k_{2x}^2 = k_0^2 n_1^2 - k_0^2 n_2^2 - k_{1x}^2 \\ \beta_{TE} = k_0^2 n_1^2 - k_{1y}^2 \end{cases}. \quad (4)$$

(4)式中 β_{TE} 代表 TE 模的传播常数, k_0 为真空中的波数。 k_{1x} 和 k_{1y} 分别满足下列特征方程:

$$\begin{cases} k_{1x}a = p\pi + 2\arctan(n_1^2 k_{2x} / n_2^2 k_{1x}) \\ (p = 0, 1, 2, \dots) \\ k_{1y}b = q\pi + 2\arctan(k_{2y} / k_{1y}) \\ (q = 0, 1, 2, \dots) \end{cases}. \quad (5)$$

通过耦合模理论求得了 κ_0 后,可以根据参考文献^[13]的方法得到耦合区内任意位置的振幅耦合比率为

$$\kappa = \sin \left[\frac{\kappa_0 (2R + a)^2}{4a} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} (\cos \theta - \cos \theta_0) \cos^2 \theta d\theta \right], \quad (6)$$

式中 $\theta_0 = \arccos \left(\frac{2R - a + 2\Delta}{2R + a} \right)$ 是耦合区边缘到中心的角,如图 1(a)所示。本文定义耦合区内任意位置的强度耦合比率(κ^2)为耦合区内任意位置的耦合系数,下文中所有计算和数值模拟得出的耦合系数均遵循此定义。

3.2 理论方法误差分析

3.1 节的理论方法依然是在弱导条件下得出的,用于分析本文的垂直耦合结构纳米 MRR 会带来误差,因为本文的垂直耦合结构纳米 MRR 具有高折射率差,不满足弱导条件,且直波导和微环波导的尺寸都在百纳米量级。本节通过与时域有限差分(FDTD)数值分析方法的比较研究,确定理论方法的误差及其有效范围。

利用 3.1 节的理论方法和 3D-FDTD 方法,分别对直波导与微环波导垂直耦合时的 E_{x0}^x 模式进行理论计算和数值分析,结果如图 3 所示。具体参数如下: $\lambda=1550$ nm, $n_1=3.48$, $n_2=1.46$, $a=350$ nm, $b=300$ nm,偏移量 Δ 的值分别取 100 nm 和 150 nm。图 3 给出耦合系数(即 κ^2)随耦合层厚度 d 的变化情况,其中实线代表理论计算结果、虚线代表 3D-FDTD 数值模拟结果。对理论结果与 3D-FDTD 模拟结果的

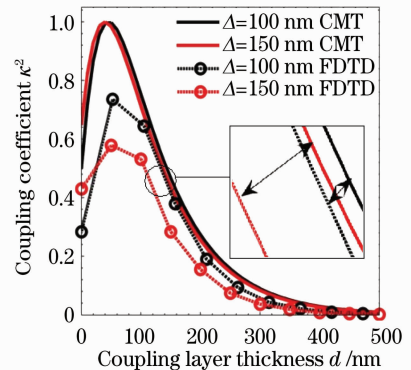


图 3 基于耦合模理论计算方法与 FDTD 计算结果的比较

Fig. 3 Comparison of the theoretical results based on CMT and FDTD simulation

差别部分进行了局部放大,局部放大图也置于图3中,并用箭头线标示出了基于耦合模理论的解析计算方法与FDTD数值计算结果的偏差。

从图3可以看出,基于耦合模理论的解析计算与3D-FDTD数值模拟结果存在一定偏差,而且偏差量随着横向制作工艺失准(即偏移量 Δ)的增加而增大。分析认为偏差的原因在于本文的直波导与微环波导尺寸在纳米量级、微环的半径只有 $5\ \mu\text{m}$,且波导材料具有高折射率差(芯/包层的折射率比为 $2.38:1$)。进一步分析其物理机理:根据参考文献[22],将直波导和微环波导看成一个两波导系统,当直波导和微环波导使用高折射率差材料、同时二者垂直耦合间距 d 较小的时候,在该两波导系统的耦合区域存在强相互耦合作用,此时两波导系统的超模^[22]不能描述为微环波导和直波导两者各自本征模式的线性叠加,所以不满足耦合模理论的基本假设,使得耦合模理论计算的结果与3D-FDTD精确数值模拟计算的结果相比存在很大误差。其他研究者在用相似理论方法研究侧面耦合结构MRR时^[23],也指出如果微环的半径小于 $10\ \mu\text{m}$,理论方法就会出现不精确。此外,由于电场在两种高折射率差介质表面不连续,使得电场在纳米宽度低折射率介质区域内会出现叠加增强,即通常所说的狭缝波导现象^[24]。对于本文所讨论的垂直结构MRR,通过改变垂直耦合层的厚度 d 的数值,用FVFEM数值方法模拟计算光场能量的分布情况,发现当直波导与微环之间的间距在 $d \leq 50\ \text{nm}$ 范围内,电场在氧化硅层内叠加增强,因此氧化硅层的光场能量很强。随着 d 的增加,氧化硅层的光场能量逐渐减小,两波导之间的相互耦合作用逐渐加强,所以当 $d \leq 50\ \text{nm}$ 时,耦合系数 κ^2 随 d 的增大而增大;当 $d > 50\ \text{nm}$ 时,氧化硅层的光场能量较小,光场能量集中在两波导中,两波导之间的相互耦合作用占主导,所以当 $d > 50\ \text{nm}$ 时,耦合系数 κ^2 随 d 的增大而减小。虽然上述理论方法在处理高折射率差、亚微米/纳米量级波导时有误差,但从图3可以看出其与3D-FDTD数值方法得出的模拟结果的趋势相同,而且两种方法均显示在耦合层厚度 $d \geq 400\ \text{nm}$ 时,耦合系数趋近于零。因此,认为可以利用基于耦合模理论的解析方法得出器件的初始结构参数,并为精确的3D-FDTD数值模拟确定模拟计算范围,减少模拟计算时间复杂度,最终得出器件优化结构参数。

4 垂直耦合结构纳米微环谐振器的工艺失准分析

根据上节得出的基于耦合模理论的解析方法,并与3D-FDTD数值方法相结合,研究高折射率差材料纳米量级直波导与微环波导垂直耦合的工艺失准特性。这里工艺失准是指由于制作工艺误差所引起的直波导与微环波导的偏移量 Δ 以及耦合层厚度 d 的实际制作尺寸与设计值之间的偏差。而工艺失准特性则是指由于 Δ 和 d 的工艺失准所引起的垂直耦合结构纳米MRR器件性能的变化。

垂直耦合结构纳米MRR的结构、材料等技术参数同上。解析方法得出结果表明,当耦合层厚度 $d = 400\ \text{nm}$ 时,耦合系数趋近于零,因此将3D-FDTD数值模拟设定在 $d < 400\ \text{nm}$ 的范围,耦合层厚度 d 的取值分别为 $120, 150, 180, 200, 220$ 和 $300\ \text{nm}$,得到不同耦合层厚度 d 情况下,耦合系数 κ^2 随偏移量 Δ 变化的3D-FDTD模拟结果,如图4所示。

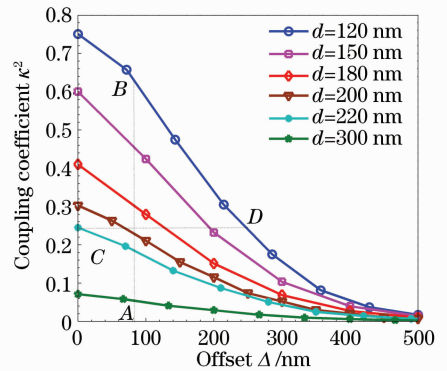


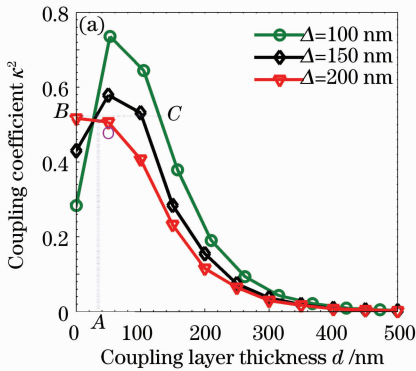
图4 不同耦合层厚度下,耦合系数随偏移量的变化曲线

Fig. 4 Coupling coefficient κ^2 varies with offset Δ for different coupling layer thicknesses d

由图4可见,当工艺失准比较小,即偏移量 Δ 在 $100\ \text{nm}$ 及以内时(图4中AB虚线所示),随着耦合层厚度 d 增大,耦合系数逐渐减小,当 $d > 300\ \text{nm}$ 后,直波导与微环波导的耦合效率较低。如果器件性能对耦合系数要求比较低,则可以选择 $d > 300\ \text{nm}$,因为此时偏移量 Δ 对耦合系数的影响也比较小,有更大的横向制作工艺容差。当耦合系数在 24% 附近时(图4中CD虚线所示),耦合层厚度 d 和偏移量 Δ 呈相互制约关系。在实际的器件制作中,需根据工艺技术水平和器件性能要求,调整 d 和 Δ 的值,实现所需的耦合系数。当偏移量 $\Delta > 400\ \text{nm}$ 之后,即使耦合层厚度 d 很小,直波导与微

环波导的耦合效率也非常低。

进一步地,图 5 给出了在不同偏移量 Δ 下,耦合系数随耦合层厚度 d 变化情况的 3D-FDTD 数值模拟结果。首先从图 4 模拟结果大致确定了偏移量的允许范围,为了获得最佳工艺容差值,偏移量 Δ 取值分为两组分别进行 3D-FDTD 模拟,第一组 Δ 取 100,150 和 200 nm[如图 5(a)所示],第二组 Δ 取 350,400 和 450 nm[如图 5(b)所示]。在图 5(b)中,三条曲线都是单调下降的,没有交点。当偏移量 $\Delta > 350$ nm 时,微环波导已经偏移出了直波导区,即



直波导与微环波导已经没有重叠区,此时微环波导与直波导之间几乎没有耦合。在图 5(a)中,三条曲线相交于一点 O ,此时 O 点对应的耦合层厚度 d 约为 30 nm,对应的耦合系数约为 52%。图 5(a)还表明,在 d 约为 30 nm 时,不仅可获得高耦合系数,而且制作工艺容差很大,对大范围的偏移量 Δ 变化不敏感。这一现象对于垂直耦合结构纳米 MRR 的实际制作非常重要。为了证实这一点,进一步用 FDTD 数值模拟方法对 $d=30$ nm, Δ 的变化范围在 0~500 nm 进行 3D-FDTD 数值模拟,结果如图 6 所示。

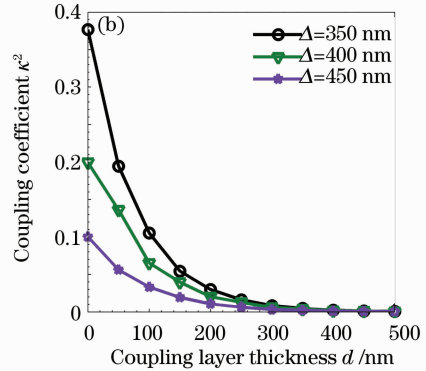


图 5 不同偏移量下,耦合系数随耦合层厚度的变化

Fig. 5 Coupling coefficient varies with coupling layer thickness for different offsets

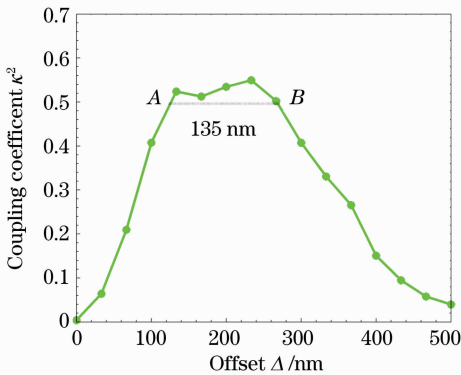


图 6 $d=30$ nm 时耦合系数随偏移量的变化

Fig. 6 Coupling coefficient varies with offset for $d=30$ nm

定义横向工艺容差(即 Δ 的工艺容差)为耦合系数从峰值处降低 5% 所对应的 Δ 差值。图 6 中耦合系数的峰值为 55%, Δ 的工艺容差约为 135 nm(如图 6 中 AB 所示, $A \approx 130$ nm, $B \approx 265$ nm)。当偏移量 Δ 在 AB 区域中时,耦合系数始终保持在较高值,也就是说此时 Δ 的工艺容差较大。得到 $d=30$ nm 这一耦合区厚度的优化结构参数,从垂直耦合结构纳米 MRR 的实际制作方面来看是非常有意义的事情,因为它解决了在纳米尺度上控制 MRR 横向工艺容差的技术难题。在此基础上,进一步观

察纵向工艺误差(即 d 的制作误差)对耦合系数的影响。用 3D-FDTD 模拟不同耦合层厚度 d 时耦合系数与偏移量 Δ 之间的关系,如图 7 所示。从图中可以看出,耦合层厚度 $d=30$ nm 是偏移量 Δ 的工艺容差发生变化的临界点,当耦合层薄膜厚度 $d < 30$ nm 时, Δ 的工艺容差较大;当耦合层薄膜厚度 $d > 30$ nm 时,工艺容差迅速变小。分析其物理意义,根据参考文献[24],电场在两种高折射率差介质表面不连续,使得电场限制在低折射率的氧化硅层

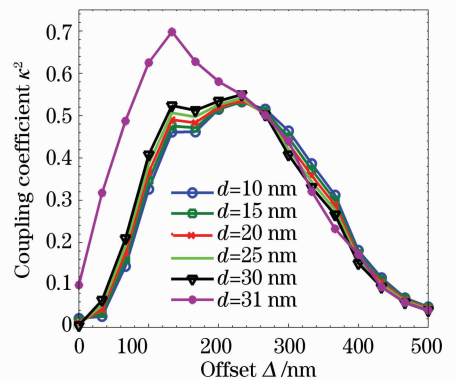


图 7 不同耦合层厚度下,耦合系数随偏移量的变化

Fig. 7 Coupling coefficient varies with offset for different coupling layer thickness

内并叠加增强,出现狭缝波导的模式。选取直波导和微环波导在垂直耦合中心区域的一段微元区域(可以近似看成两个直波导垂直耦合),当 $\Delta = 133$ nm时(即图7中耦合系数最高值所对应的 Δ 位置),通过改变垂直耦合层的厚度 d 的数值,用FVFEM模拟计算出在稳态时此微元区域内能量的分布情况,如图8所示(A为微环,B为直波导)。在10~350 nm的大范围内,可以发现 $d \leq 100$ nm时,氧化硅层中都有光场在传输,随着 d 逐渐增加,氧化硅层中光场能量逐渐减少,而微环中的能量逐渐增加,说明两波导的耦合作用在逐渐加强。 $d > 100$ nm时,氧化硅层中的光场能量逐渐消失,主要表现为两波导系统的相互耦合作用,随着 d 继续增

加,耦合进微环波导的能量逐渐减少。进一步地,从图8还可以看出,当 $d = 30$ nm,约束在氧化硅层中光场能量很强;在 d 从31 nm增加到50 nm的过程中,约束在氧化硅层中的光场能量迅速减小、波导中的能量迅速增加,因此两波导之间的相互耦合作用逐渐增强,耦合系数 κ^2 增加。从上述仿真结果,可以得出如下结论:在 $d < 30$ nm范围内,约束在氧化硅层中的光场能量很强,因此表征耦合进微环波导中能量的耦合系数 κ^2 对偏移量 Δ 的变化不敏感;当 $d > 30$ nm后,氧化硅层中的能量逐渐减小,两波导之间的相互耦合作用占主导,即使很小的偏移量 Δ 的变化都会对耦合系数产生大的影响。这说明可以通过优化耦合层厚度 d 来控制偏移量 Δ 的工艺容差。

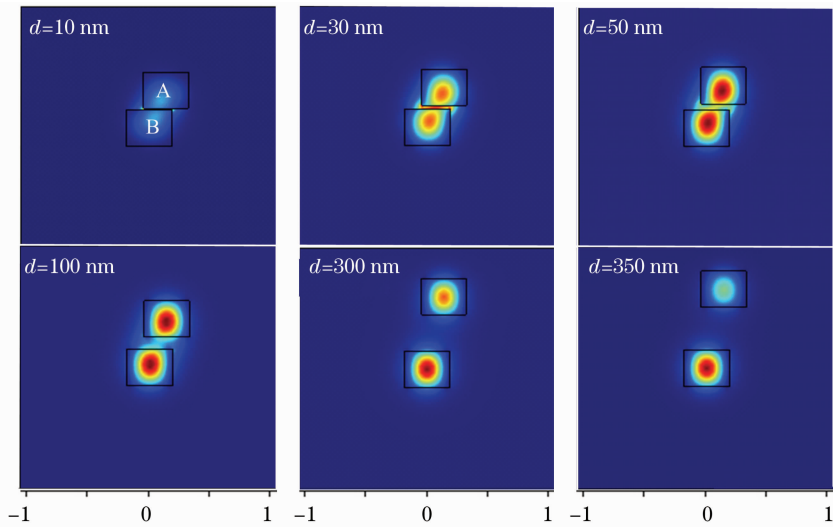


图8 d 分别为10,30,50,100,300和350 nm时的光场能量分布情况

Fig. 8 Distributions of light-field energy with $d=10, 30, 50, 100, 300$ and 350 nm, respectively

根据上述结果,并综合考虑目前的薄膜生长工艺技术水平,认为本文讨论的垂直耦合结构纳米MRR的耦合层厚度 d 设计为29 nm最为合适,一方面可以具有高耦合系数(κ^2)以及大横向制作工艺容差(即大 Δ 工艺容差),另一方面,实际制作中将薄膜生长厚度误差控制在 ± 1 nm之内,以目前的工艺技术水平是完全可以做到的。

5 结 论

针对基于高折射率差波导材料的垂直耦合结构纳米MRR,首先从理论上研究了其垂直耦合与耦合层厚度 d 以及直波导和微环之间的横向位置偏移量 Δ 之间的关系,并通过与3D-FDTD数值模拟方法的比较研究,得出理论方法的误差及其有效范围。之后利用理论结果,缩小3D-FDTD数值模拟范围,深入研究垂直耦合结构纳米MRR的横向偏

移量 Δ 的工艺失准特性,得到垂直耦合区厚度 d 的优化值,使得垂直耦合结构纳米MRR在具有高耦合系数的同时,横向偏移量 Δ 的制作工艺容差最大,对实际制作垂直耦合结构纳米MRR有重要意义。

参 考 文 献

- 1 E. A. J. Marcatili. Bends in optical dielectric guides[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(7): 2103~2132
- 2 B. E. Little, S. Foresi, G. Steinmeyer *et al.*. Ultra-compact Si-SiO₂ microring resonator optical channel dropping filters[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4): 549~551
- 3 B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus *et al.*. Microring resonator channel dropping filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6): 998~1005
- 4 V. Van, T. A. Ibrahim, K. Ritter *et al.*. All-optical nonlinear switching in GaAs-AlGaAs microring resonators[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1): 74~76
- 5 Qianfan Xu, Bradley Schmidt, Sameer Pradhan *et al.*. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator[J]. *Nature*,

- 2005, **435**(7040): 325~327
- 6 R. Polson, G. Levina, Z. Vardeny. Spectral analysis of polymer microring lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76** (26): 3858~3860
- 7 Han Xiuyou, Song Hongyan, Zhang Jianing *et al.*. Study on the integrated waveguide optical delay line based on microring resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 782~786
韩秀友, 宋红妍, 张佳宁 等. 微环谐振腔集成波导光延时线研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 782~786
- 8 Zhang Jianing, Han Xiuyou, Song Hongyan *et al.*. Study on time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30** (7): 2098~2103
张佳宁, 韩秀友, 宋红妍 等. 可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2098~2103
- 9 Han Xiuyou, Zhang Jianing, Song Hongyan *et al.*. Influence of coupling conditions on time delay line characteristics of integrated waveguide microring resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0613001
韩秀友, 张佳宁, 宋红妍 等. 耦合条件对集成波导微环延时线性能的影响 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0613001
- 10 K. Djordjev, S. J. Choi, P. Dapkus. Study of the effects of the geometry on the performance of vertically coupled InP microdisk resonators [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20** (8): 1485~1492
- 11 D. V. Tishinin, P. D. Dapkus, A. E. Bond *et al.*. Vertical resonant couplers with precise coupling efficiency control fabricated by wafer bonding [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 1003~1005
- 12 Y. Kokubun. High index contrast optical waveguides and their applications to microring filter circuit and wavelength selective switch [J]. *IEICE Trans. Electron. E Series C*, 2007, **90**(5): 1037~1045
- 13 Xin Yan, Ma Chunsheng, Xu Yuanzhe *et al.*. Characteristics of vertical bent coupling between straight and curved rectangular optical waveguides [J]. *Optik*, 2005, **116**(8): 397~403
- 14 Dimitris Alexandropoulos, Hercules Simos, Mihai Kusko *et al.*. Microring resonators with enhanced tolerance to fabrication misalignments [J]. *J. Opt. A- Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(12): 125401
- 15 M. Kusko, A. Kapsalis, C. Kusko *et al.*. Design of single-mode vertically coupled microring resonators [J]. *J. Opt. A- Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(6): 064012
- 16 T. Kato, Y. Kokubun. Three-dimensional propagation analysis of coupling efficiency using segmentation and local normal mode expansion for vertically coupled microring resonator filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(8): 2549~2554
- 17 P. P. Absil, J. V. Hryniewicz, B. E. Little *et al.*. Vertically coupled microring resonators using polymer wafer bonding [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(1): 49~51
- 18 B. E. Little, S. T. Chu. Toward very large-scale integrated photonics [J]. *Opt. & Photon. News*, 2000, **11**(11): 24~29
- 19 B. Rahman, J. Davies. Finite-element solution of integrated optical waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **2** (5): 682~688
- 20 Ma Chunsheng, Liu Shiyong. Theory of Optical Waveguide Mode [M]. Changchun: Jilin University Press, 2006. 329~334
马春生, 刘式塘. 光波导模式理论 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 2006. 329~334
- 21 E. A. J. Marcatili. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics [J]. *The Bell Systems Technical Journal*, 1969, **48**(21): 2071~2102
- 22 G. H. Wang, P. Shum, G. B. Ren *et al.*. Theoretical investigation of nanowaveguide based optical coupler using mode expansion transfer matrix [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2010, **52**(5): 1123~1129
- 23 Ma Chunsheng, Xin Yan, Xu Yuanzhe *et al.*. Characteristic analysis of bending coupling between two optical waveguides [J]. *Opt. & Quantum Electron.*, 2005, **37**(11): 1055~1067
- 24 Vilson R. Almeida, Qianfan Xu, Carlos A. Barrios *et al.*. Guiding and confining light in void nanostructure [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(11): 1209~1211

栏目编辑: 韩峰