

(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101825745 B

(45) 授权公告日 2011. 08. 24

(21) 申请号 201010138228. 9

cavities. 《OPTICS EXPRESS》. 2008, 第 16 卷 (第 20 期), 15887-15896.

(22) 申请日 2010. 04. 02

审查员 李国琛

(73) 专利权人 北京邮电大学

地址 100876 北京市海淀区西土城路 10 号

(72) 发明人 田慧平 翟羿 纪越峰

(51) Int. Cl.

G02B 6/13 (2006. 01)

G02B 6/122 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101533126 A, 2009. 09. 16, 全文 .

JP 特开 2005-91467 A, 2005. 04. 07, 全文 .

CN 1558266 A, 2004. 12. 29, 全文 .

Cameron L. C. Smith. Reconfigurable

microfluidic photonic crystal slab

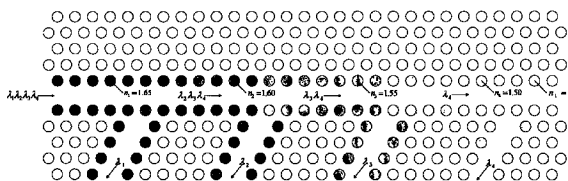
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 5 页

(54) 发明名称

利用微流体注入技术且波长可调的二维光子晶体解复用器

(57) 摘要

本发明涉及一种利用微流体注入技术并且输出波长可调谐的二维光子晶体波分解复用器的实现方法, 本发明设计了将微流体注入技术引入二维光子晶体解复用器的结构, 通过在解复用器不同的位置处注入不同的折射率的微流体, 从而改变光子晶体的导模的截止频率, 不同位置处的导模截止频率不同, 从而实现波长解复用的作用, 本发明采用三角晶格的介质背景空气孔结构的光子晶体, 更加贴近目前广泛应用的基于 SOI 的光子晶体制造技术, 有很好的可实现性, 另外, 利用微流体注入技术的可抽出性, 可以根据需要重新注入其他折射率的微流体, 从而达到波长可调谐的目的, 改善了成品的光子晶体能带特性的可调整性, 从而为未来全光通信网络、光计算机等领域提供了一种可实现的超小型的可调谐波分解复用器的方法。



1. 一种利用微流体注入技术并且输出波长可调谐的二维光子晶体波分解复用器,其中:

该解复用器是在三角晶格硅介质背景空气孔光子晶体 W0.9 型波导中,在最靠近波导的两行空气孔中注入折射率不同的微流体,波导由四部分级联而成,每一部分注入不同折射率的微流体,在每一部分的末端设有引出波导,其特征在于当在光子晶体波导最靠近波导的两行空气孔中注入不同折射率的液体时,在禁带中的导模将发生移动,使波导的截止频率发生改变,频率处于光子带隙中截止频率以下的光波将不能在主波导中传输,并通过引出波导将所要波长的光波导出,波导中四个注入不同折射率微流体部分的波导的截止频率是不同的,可以导出四个不同波长的光波,达到解复用的目的。

2. 如权利要求 1 所述的利用微流体注入技术并且输出波长可调谐的二维光子晶体波分解复用器,其特征在于可以通过微流体的抽取技术将已经注入空气孔的微流体抽取出来,并且根据需要再重新注入其他的不同折射率的液体,使光子晶体波导的导模截止频率重新划定,这样其他波长的光波可以被导出,达到输出波长可调谐的目的。

利用微流体注入技术且波长可调的二维光子晶体解复用器

技术领域

[0001] 本发明涉及一种利用微流体注入技术并且输出波长可调谐的二维光子晶体波分解复用器的实现方法,属波分解复用器领域。

背景技术

[0002] 伴随掺铒光纤放大器 (EDFA) 的实用化,波分复用 (WDM) 技术在近年来得到了迅速发展。而波分复用器作为 WDM 系统的关键器件,也成为当前国内外研究的热点。目前关于波分解复用器的研究主要有利用半导体 (文献 1.Nasu, Y. ;Watanabe, K. ;Itoh, M. ; Yamazaki, H. ;Kamei, S. ;Kasahara, R. ;Ogawa, I. ;Kaneko, A. ;Inoue, Y. ;“Ultrasmlal 100GHz 40-Channel VMUX/DEMUXBased on Single-Chip 2.5 % - Δ PLC,” Journal of Lightwave Technology, v 27, n 12, p 2087-2094, June 15,2009) 或光子晶体光纤 (文 献 2.Ming-Yang Chen ;Jun Zhou ;Pun, E. “A Novel WDMComponent Based on a Three-Core Photonic Crystal Fiber,” Journal of Lightwave Technology, v27, n 13, p 2343-2347, July 1,2009) 或光栅 (文献 3.Mu, Jianwei ;Xu, Chenglin ;Huang, Wei-Ping,“An optical power combiner/wavelength demultiplexing module for hybrid WDM FTTX,” OpticsExpress, v 17, n 6, p 4791-4797, March 16,2009、文献 4.Gamage, Prasanna ;Nirmalathas, Ampalavanapillai ;Lim, Christinal ;Novak, Dalma ;Waterhouse, Rodney,“Optical tandemsingle-sideband-based WDM interface for millimeter-wave fiber-radio multisector antenna basestation,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, v 57, n 3, p 725-732, March2009、文献 5Pei, Li ;Zhao, Ruifeng ; Ning, Tigang ;Dong, Xiaowei ;Wei, Yanl ;Qi, Chunhui ;Ruan, Yi,“Wavelength-division demultiplexer based on FBG coupler”, Guangxue Xuebao/Acta OpticaSinica, v 29, n 2, p 308-311, February 2009) 还有光子晶体。利用光子晶体可以形成光子带隙,并在完美光子晶体中引入缺陷可以在光子禁带中形成导模,光波可以在缺陷中以缺陷模式传播,另外光子晶体还具有潜在的带宽大,结构设计灵活,光子晶体结构材料器件体积小,可实现大规模存储且便于与现有的光通信器件集成,非常适用于光子器件的制造。(文献 6 Lu, H ;Tian, HP ;Li, CH, et al. “Research on new type of slow light structure based on 2D photonic crystalcoupled cavity waveguide,” ACTA PHYSICA SINICA v : 58 n 3 p 2049-20552009) 也有很多小组利用光子晶体来达到波分解复用的作用 (文献 7.Florous, Nikolaos J. ;Saitoh, Kunimasa ;Koshiha, Masanori. “Three-color photonic crystal demultiplexer based on ultralow-refractive-indexmetamaterial technology,” Optics Letters, v 30, n 20, p 2736-2738, October 15,2005,文献 8. F. S. -S. Chien ;Y. -J. Hsu, W. -F. Hsieh ;S. -C. Cheng,“Dual wavelength demultiplexing by couplingand decoupling of photonic crystal waveguides,” OPTICS EXPRESS, Vol. 12, No. 6, p 1119-1125,2004),但是这些系统是针对空气背景介质柱材料的光子晶体,而目前制作光子晶体主要采用的方法是把 SOI (Silicon On Insulator) 材料进行刻胶、曝

光、腐蚀等加工,形成以硅为背景的空气孔光子晶体,对于实际制作文献 7、8 中的介质柱材料的光子晶体仍存在一定困难。另外,有的小组通过改变空气孔的半径(文献 9. Tapio Niemi, Lars Hagedorn Frandsen, KristianKnak Hede, Anders Harpøth, Peter Ingo Borel, and Martin Kristensen, “Wavelength Division Demultiplexing Using Photonic Crystal Waveguides,” IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 18, NO. 1, JANUARY 1, 2006) 或沿传播方向的晶格常数(文献 10 Marrocco, V. ;Grande, M. ;De Sario, M. ; Petruzzelli, V. ;Prudenzano, F. ;D’ Orazio, A. “PBG chirped waveguide for efficient signal routing,” ICTON-MW’ 072007) 来改变光子晶体的能带结构,从而实现解复用的作用。但这种方法需要很高的制作工艺精度,一般要达到纳米量级的精度,目前实际制作光子晶体的工艺很难达到。

[0003] 而通过把光子晶体和微流体技术(文献 11D. Psaltis, S. R. Quake and C. H. Yang, “Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics,” Nature 442, 381–386 (2006). 文献 12C. Monat, P. Domachuk, and B. J. Eggleton, “Integrated optofluidics: A new river of light,” Nature Photonics 1, 106–114 (2007).) 结合可以改变光子晶体许多的特征,如能带曲线的移动,慢光带宽的调整等(文献 13. M. Ebnali-Heidari, C. Grillet, C. Monat, B. J. Eggleton “Dispersion engineering of slow light photonic crystal waveguides using microfluidic infiltration” OPTICSEXPRESS, Vol. 17, No. 3, p 1628–1635, 2009, 文献 14. D. Erickson, T. Rockwood, T. Emery, A. Scherer and D. Psaltis, “Nanofluidic tuning of photonic crystal circuits,” Opt. Lett. 31, 59–61 (2006)。另外,由于空气孔光子晶体自身固有的可渗透性质,光子晶体可以被稳定的注入折射率可选择的不同液体,实验表明可以稳定的将液体注入某单个空气孔内(文献 15F. Intonti, S. Vignolini, V. Turck, M. Colocci, P. Bettotti, L. Pavesi, S. L. Schweizer, R. Wehrspohn and D. Wiersma, “Rewritable photonic circuits,” Appl. Phys. Lett. 89, 2111171–2111173 (2006), 意味着人们可以根据需要,在光子晶体的不同区域注入不同折射率的微流体,给光子晶体带来更多有用的性质,扩大了微流体注入技术在光子晶体领域使用的范围。除此以外,微流体注入技术有很好的重写性,也就是可以把已经注入到光子晶体空气孔内的液体抽出来,根据需要再重新注入其他液体(文献 15, 文献 16C. L. Smith, U. Bog, S. Tomljenovic-Hanic, M. W. Lee, D. K. Wu, L. O’ Faolain, C. Monat, C. Grillet, T. F. Krauss, C. Karnutsch, R. C. McPhedran, and B. J. Eggleton, “Reconfigurable microfluidic photonic crystal slab cavities,” Opt. Express 16, 15887–15896 (2008), 这样可以很好的重新调整光子晶体的光学特性,增加了光子晶体的重塑性和可调谐性。总之,利用微流体注入技术,给人们提供了一种新的、更加可行的调整光子晶体结构的方式,它不像改变光子晶体几何结构那样难于制作加工,只是稳定地、可控地简单改变注入到空气孔内的液体的折射率就可以实现。

发明内容

[0004] 本发明目的在于解决设计光子晶体波分解复用器中所存在的如传统的改变光子晶体空气孔或介质柱半径实现解复用器时,需要较高的制作工艺精度,而目前的制作水平难以达到,并且制作出的解复用器难以实现输出波长可调谐的问题,从而提出了利用微流

体注入技术的二维空气孔光子晶体解复用器,另外本发明采用基于 SOI 材料制作的背景介质空气孔材料的光子晶体,相对于制作空气背景介质柱的光子晶体有更好的可实现性和较成熟的加工工艺。该解复用器可以通过在 SOI 材料顶层 Si 做掩模、在掩模涂电子束胶、离子刻蚀、干法刻蚀,去掉掩模等步骤完成空气孔光子晶体的制作,再利用微流体注入技术在最靠近波导的两行和引出波导两侧注入特定折射率的微流体,从而调整波导的截止频率,实现解复用器的作用。

[0005] 在利用微流体改变光子晶体导模截止频率实现解复用器的原理的基础上,通过微流体的抽取技术,可以抽出已经注入到光子晶体的微流体,再根据需要重新注入其他不同折射率的微流体,从而改变导模截止频率,达到输出其他波长光波的目的,实现输出波长的可调谐性。

[0006] 本发明的目的可通过如下措施来实现:

[0007] 一种利用微流体注入技术并且输出波长可调谐的二维光子晶体波分解复用器实现方法,其中:

[0008] 该解复用器是在二维三角晶格空气孔光子晶体中利用微流体注入技术实现,其中该二维光子晶体引入线缺陷,形成 W0.9 型线波导,再在波导的下方引入线缺陷形成导出通道,可以通过传统的 SOI 制作方法做出空气孔型的解复用器结构;然后在最靠近波导的两行和导出通道两侧注入不同折射率的微流体,可以通过微流体注入技术实现,并可以抽去液体,根据需要重新注入其他折射率的液体,调整导模的截止频率,以达到输出其他波长光波的目的,即输出波长可调谐。

[0009] 所述的二维三角晶格空气孔光子晶体解复用器结构是由四个 W0.9 型线波导级联而成,在每个线波导的尾部都设有导出波导,目的是引出所要下载的光波。

[0010] 所述的二维光子晶体中,背景介质为硅,空气孔中是空气。

[0011] 所述的二维光子晶体,晶格常数为 $a = 341\text{nm}$,空气孔的半径为 $0.3a$ 。

[0012] 所述的背景介质硅的折射率为 3.52,空气孔的折射率为 1。

[0013] 所述的四个 W0.9 型线波导,第一个波导长为 $5a$,另外三个波导长度为 $7a$,在每个波导靠近波导的两行用微流体注入技术注入不同折射率的微流体,采用 $n_1 = 1.65$, $n_2 = 1.60$, $n_3 = 1.55$, $n_4 = 1.50$ 。

[0014] 所述的 n_1, n_2, n_3, n_4 分别指四个 W0.9 波导两侧两行的注入微流体的折射率。

[0015] 所述的引出波导是在每个 W0.9 波导的尾处,在下方抽去一排空气孔形成的,在引出波导的两侧同样分别注入折射率为 $n_1 = 1.65$, $n_2 = 1.60$, $n_3 = 1.55$, $n_4 = 1.50$ 的微流体, n_i 表示第 i 个 W0.9 波导的引出波导两侧空气孔中注入的微流体的折射率。

[0016] 所述的光子晶体解复用器结构可以用 SOI 制作技术实现,折射率不同圆柱可以通过微流体注入技术注入空气孔实现。

[0017] 所述的输出波长可调谐,可以通过微流体的抽取技术,将已经注入到空气孔中的液体抽取出来,再重新注入其他折射率的液体实现。

[0018] 与传统方法相比本发明有如下优点:

[0019] 传统利用光子晶体缺陷模的截止频率而形成的解复用器主要是通过改变晶体的几何结构,例如空气孔或介质柱的半径或晶格常数,但这种解复用器要求制作工艺很高,一般都在纳米精度的量级,这给实际制作带来很大困难,但利用微流体的注入技术,可以稳定

的简单的可选择地注入不同折射率的微流体,同样可以达到改变导模截止频率的目的,且本发明采用基于 SOI 材料制作的背景介质空气孔材料的光子晶体,相对于制作空气背景介质柱的光子晶体有更好的可实现性和较成熟的加工工艺;另外,传统的光子晶体解复用器制作成型后很难改变其输出波长,而利用微流体注入技术实现的解复用器可以通过抽取技术将已注入的液体抽出,重新注入其他折射率的液体,导模截止频率可以重新调节,到达输出波长可调谐的目的。

[0020] 本发明的原理如下:

[0021] 本解复用器由 W0.9 型三角晶格介质背景空气孔光子晶体作为基本机构,再在沿波导方向利用微流体技术分别注入不同折射率的液体,形成四个小的 W0.9 型波导,四个波导以级联方式排列,第一个波导为 $5a$,剩下三个波导长为 $7a$,再在每个波导尾部设置导出波导,导出波导两侧也分别注入和其所在波导相同折射率的微流体。

[0022] 对于普通的三角晶格空气孔 W0.9 型光子晶体波导,在光子禁带中会形成两条导模,一条是偶模(基模)另一条是奇模(一阶模),通常情况下,只有偶模才能在光子晶体波导中传播,所以只需关心偶模的能带曲线。不同的波导的偶模存在截止频率,频率低于截止频率的光波无法在波导中传播,而当在靠近波导的两行的空气孔中注入不同折射率的微流体时,波导的偶模会发生啁啾现象,频率会发生整体的移动,当注入微流体的折射率增加时,导模会往低频处移动,导模的截止频率也会发生红移。

[0023] 在实际设计复用器结构时,令越靠近波导入口的部分的空气孔里注入越高的折射率的微流体,每一部分的波导注入的微流体的折射率依次降低,当含有不同波长的光波经过第一个波导时,此时只有在第一个波导的截止频率以上的光波才能通过波导,当光波遇到第二个波导时,由于此时波导的截止频率发生改变,频率处于第一个波导和第二个波导的截止频率之间的光波将不能在第二个波导中传播,将形成倏逝波,这部分频率的光波会被反射回来,这时可以通过引出波导将这部分光波导出,输出通道 1 的光波。但此时仍然需要在引出波导两侧的空气孔注入微流体,这样才能保证输出的光能够导出。这样光波在每个波导的交界处都会下载一路光波,形成四个通道的解复用器,并且四个通道出射的光波的频率依次增大,波长依次减小。

[0024] 在使用微流体的抽取技术时,可以抽掉原来注入的微流体,再注入其他折射率的微流体,这样波导的导模会发生新的频移,依照上述的原理,同样可以输出四个波长的光波,但此时输出的波长较之前有所改变,即所输出的波长将发生改变,可以根据所要输出的波长,选择注入对应折射率的微流体,从而达到输出波长可调谐的目的。

附图说明

[0025] 以下各图所取的光子晶体的结构参数均与具体实施方式中相同。

[0026] 图 1. 是本解复用器的结构,基本结构为三角晶格介质背景空气孔的光子晶体,四个 W0.9 型线波导级联而成,第一个波导长为 $5a$,剩下三个波导长度为 $7a$,在每个波导靠近波导的两行用微流体注入技术注入不同折射率的微流体,采用 $n_1 = 1.65$, $n_2 = 1.60$, $n_3 = 1.55$, $n_4 = 1.50$ 。

[0027] 图 2. 是基本的三角晶格介质背景空气孔的 W0.9 型波导

[0028] 图 3. 是基本的三角晶格介质背景空气孔的 W0.9 型波导的能带曲线

[0029] 图 4. 是在基本的三角晶格介质背景空气孔的 W0.9 型波导中前两行孔中注入微流体的结构图。

[0030] 图 5. 是在注入折射率不同时,光子晶体波导能带曲线的变化情况。

[0031] 图 6. 采用 $n_1 = 1.65, n_2 = 1.60, n_3 = 1.55, n_4 = 1.50$ 时,各个通道输出光波的功率透射谱。

[0032] 图 7. 采用注入微流体的折射率为 $n_1 = 2.00, n_2 = 1.95, n_3 = 1.90, n_4 = 1.85$ 时,各个通道输出光波的功率透射谱。

具体实施方式

[0033] 解复用器的结构是由四个 W0.9 型线波导级联而成,如图 1. 所示。三角晶格介质背景空气孔光子晶体作为基本机构,再在沿波导方向利用微流体技术分别注入不同折射率的液体,形成四个小的 W0.9 型波导,四个波导以级联方式排列,第一个波导长为 $5a$,另外三个波导长为 $7a$,再在每个波导尾部设置导出波导,导出波导两侧也分别注入和其所在波导相同折射率的微流体。

[0034] 首先看一下基本的 W0.9 型波导的结构,如图 2. 所示,图中 a 是晶格常数, $a = 341\text{nm}$,波导宽度 $d = 0.9\sqrt{3}a$,空气孔的半径为 $0.3a$,折射率为 1,介质背景采用纯硅,折射率为 3.52。利用平面波展开法 (PWE),对此结构进行数值仿真,计算属于不同波矢的频率的本征值,得到归一化波矢 - 归一化频率的能带曲线,如图 3. 所示,由图中可以看到,在光子禁带中会形成两条导模,一条是偶模(基模,图中蓝线标注),另一条是奇模(一阶模,图中红线标注),分别对应电场分布相对于波导中心有偶对称性和奇对称性的模式,因为实际制作中都要在光子晶体两侧面引入脊波导用来导入和导出光波,而禁带中的偶模和脊波导中的模式有更多重叠的地方,也即偶模更容易在光子晶体波导中传播,所以只考虑偶模的能带曲线。从图中还可以看到波导的偶模存在截止频率,即频率低于截止频率的光波无法在波导中传播。

[0035] (1) 解复用器的实现

[0036] 利用微流体注入技术可以在介质背景空气孔结构的光子晶体中在空气孔中注入不同折射率的微流体,如图 4 所示,图中选取靠近 W0.9 波导中心的两行空气孔注入微流体,注入液体的折射率从 1.35 到 2,折射率间隔为 0.05。同样通过平面波展开法进行数值计算,得到注入相应折射率的微流体的 W0.9 波导的能带曲线,如图 5 所示。图中,截止频率最高的曲线对应于基本 W0.9 波导结构,即对应无注入微流体的情况。从图中可以看到,通过在空气孔中引入微流体,波导的偶模会发生啁啾现象,即频率会发生整体向低频处的移动;同时,当注入不同折射率时,导模的频移是不同的,注入微流体的折射率越高,向低频处的频移越大,也就是说,越高的注入折射率,导模的截止频率越低。

[0037] 利用以上的光子晶体的光学特性,可以设计出基于导模截止频率不同而实现波长解复用的作用。在利用如图 1 所示的波长解复用器结构时,由于每一部分的波导注入的折射率依次降低,也就是波导的截止频率会依次升高,每到不同波导的交界处,频率处在两个波导的截止频率之间的光波将无法传输,将形成倏逝波,这部分频率的光波会被反射回来,这时可以通过紧邻的、适当的放置的引出波导将这部分光波收集并导出。但此时仍然需要在引出波导两侧的空气孔注入微流体,因为如果不注入微流体,空气孔结构的波导的截止

频率是最高的,这样无法导出预想波长的光波,并且还需要注入与紧邻波导相同折射率的微流体,这样才能保证预想输出的光能够导出。这样光波在每个波导的交界处都会下载一路光波,形成四个通道的解复用器,并且四个通道的光波的频率依次增大,波长依次减小。利用时域有限差分法(FDTD)进行数值仿真,可以得到四个通道的透射谱,如图6所示。由图中可以看出,四个通道输出的波长分别为 $\lambda_1 = 1569\text{nm}$, $\lambda_2 = 1550\text{nm}$, $\lambda_3 = 1536\text{nm}$, $\lambda_4 = 1519\text{nm}$,仿真中光源设置为高斯脉冲,光源的线宽覆盖所关心的每个波导的截止频率。从图中可以看出透射峰的中心波长依次降低,与之前的分析一致。

[0038] (2) 可调谐输出波长的实现

[0039] 在使用微流体的抽取技术时,可以抽掉原来注入的微流体,再注入其他折射率的微流体,这样波导的导模会发生与原波导不同的频移,依照上述的原理,同样可以输出四个波长的光波,但此时输出的波长较之前有所改变,即所输出的波长将发生改变,可以根据所要输出的波长,选择注入对应折射率的微流体,从而达到输出波长可调谐的目的。

[0040] 在实施中,利用微流体抽取技术抽掉原来注入空气孔里的微流体,改变原来设置的微流体折射率分布,即 $n_1 = 1.65$, $n_2 = 1.60$, $n_3 = 1.55$, $n_4 = 1.50$,重新分布为 $n_1 = 2.00$, $n_2 = 1.95$, $n_3 = 1.90$, $n_4 = 1.85$,可以进行同样的时域有限差分法数值仿真,得到的新的解复用器的各通道的透射谱,如图7所示,四个通道的输出波长分别为 $\lambda_1 = 1599\text{nm}$, $\lambda_2 = 1576\text{nm}$, $\lambda_3 = 1561\text{nm}$, $\lambda_4 = 1540\text{nm}$,由此可以实现对特定波长进行解复用的目的,而这种方法的实现只需要通过注入相应折射率的微流体即可,实现可调谐的输出波长。

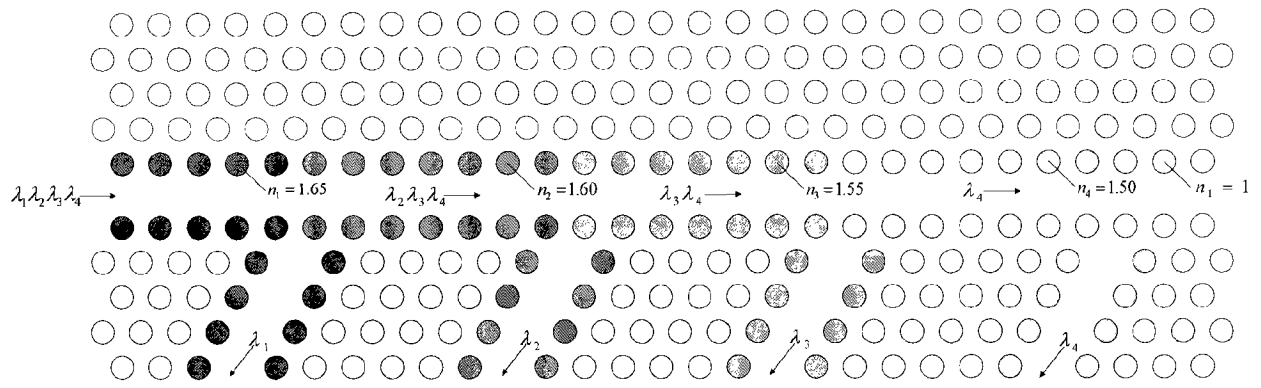


图 1

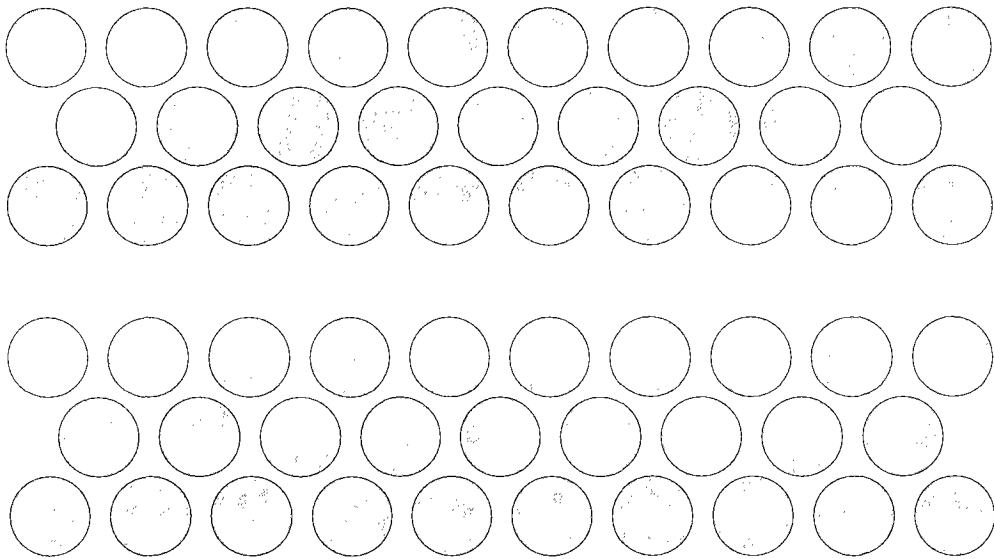


图 2

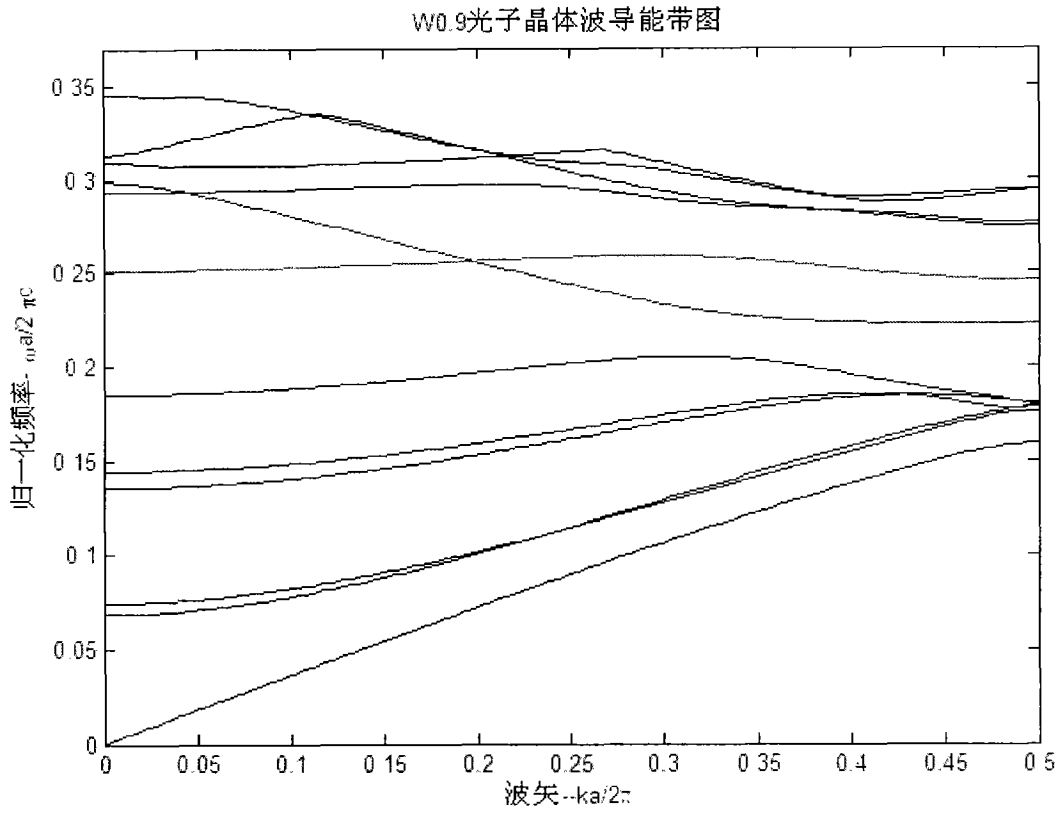


图 3

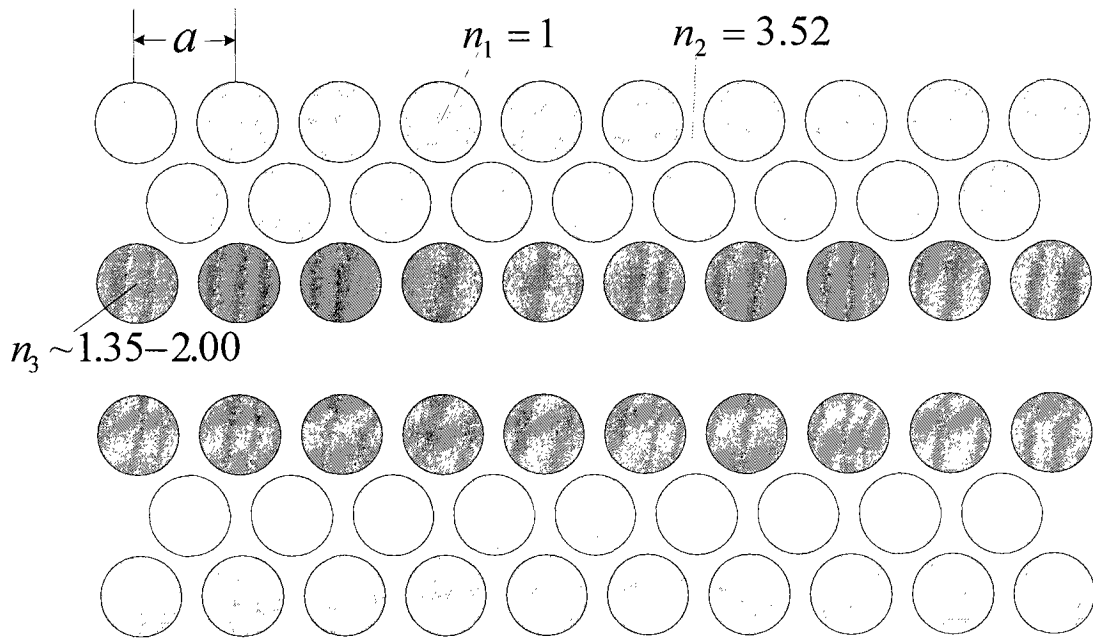


图 4

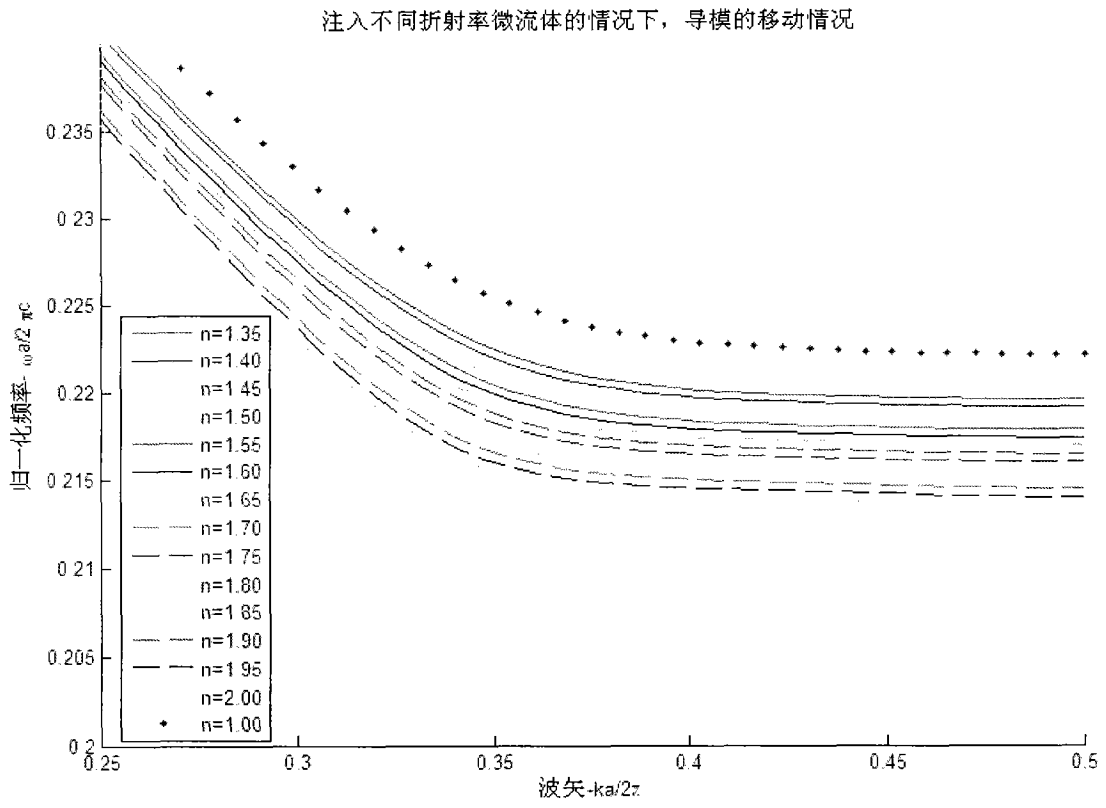


图 5

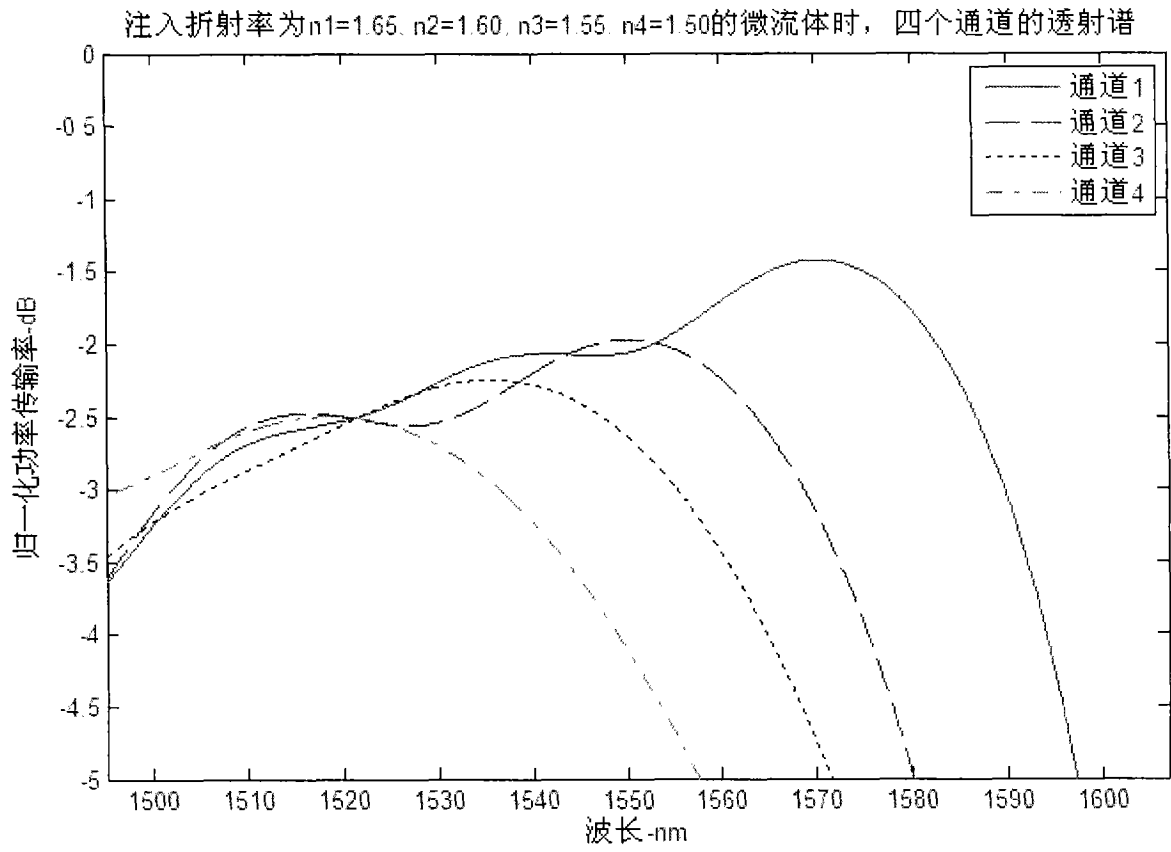


图 6

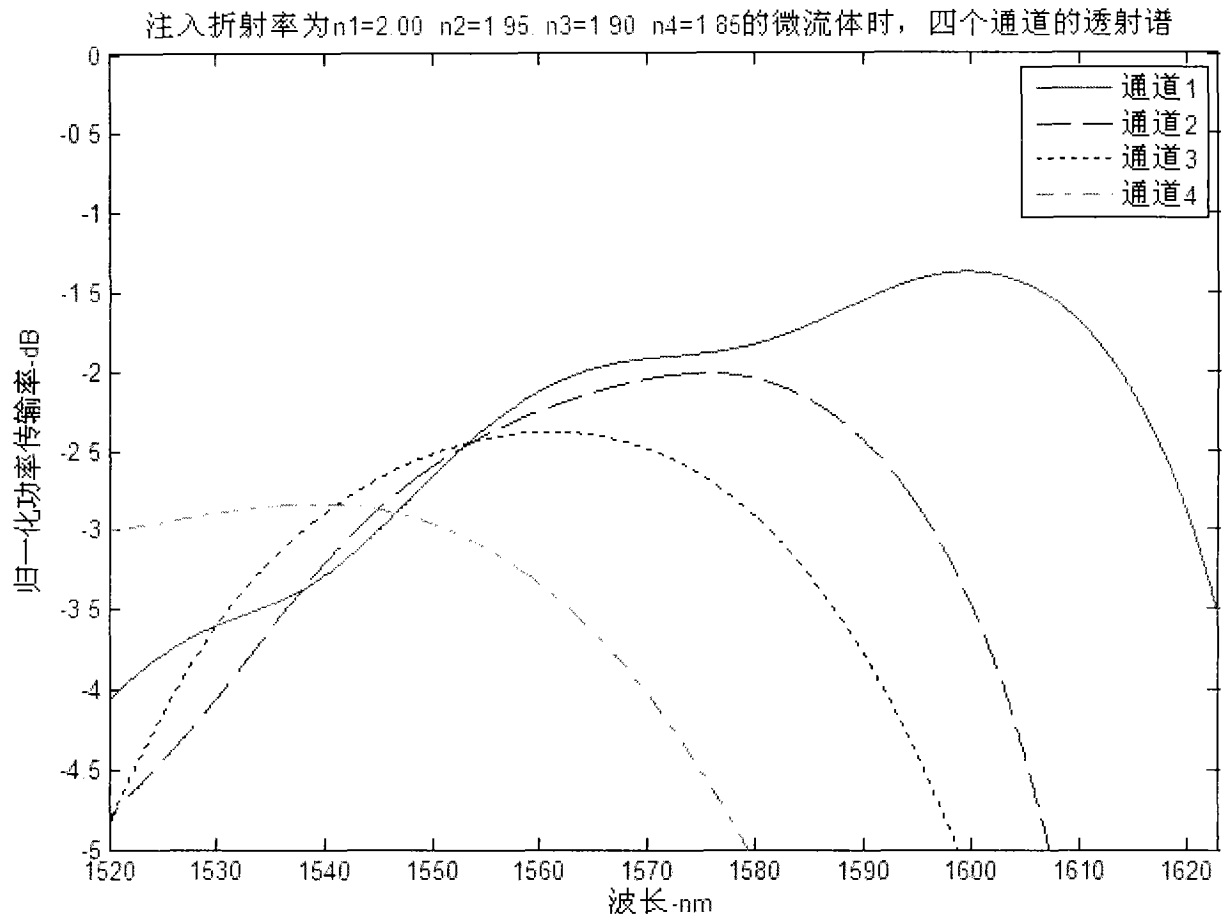


图 7