

一种基于深刻蚀的硅基周期波导微腔

喻 平¹ 邱晖晔² 吴飞青¹ 王卓远¹ 喻明艳¹ 俞恩军¹

¹浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100

²龙岩学院, 福建 龙岩 364012

摘要 研究了一种基于深刻蚀的硅基周期波导一维光子晶体微腔,采用时域有限差分(FDTD)方法对设计的微腔结构进行了模拟分析;讨论了深刻蚀对微腔品质因数的影响,计算表明采用深刻蚀可有效地保持高 Q 值并能保证微腔的机械强度。采用电子束光刻(EBL)结合感应耦合等离子体(ICP)刻蚀制作了绝缘硅(SOI)的周期波导微腔,使用扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)对器件形貌进行表征,观察到深刻蚀的衬底二氧化硅高度约为80 nm。通过波导光栅耦合光纤输入宽带光源信号对微腔器件进行光学表征,传输光谱测试表明该深刻蚀微腔器件 Q 值达 5×10^3 ,插入损耗小于-2 dB。该深刻蚀的硅基周期波导微腔可用于集成光传感器和片上波分复用滤波器 etc 应用。

关键词 集成光学; 光学器件; 光学微腔; 光子晶体; 周期波导

中图分类号 TN256 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0813001

Silicon Photonic Crystal Nanobeam Cavities Fabricated by Deep-Etching Method

Yu Ping Qiu Huiye Wu Feiqing Wang Zhuoyuan Yu Mingyan Yu Enjun

¹Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo, Zhejiang 315100, China

²Longyan University, Longyan, Fujian 364012, China

Abstract A silicon photonic crystal nanobeam cavity based on deep-etching method is presented. Using finite difference time domain (FDTD) method, the influence of deep-etching on the Q factor of nanobeam cavities is designed and analyzed. The calculated results show that the deep-etching scheme can keep the high- Q value close to the air-bridge peer, as well as robust mechanical strength. The devices are fabricated on silicon on insulator (SOI) platform using electron beam lithography (EBL) and inductively coupled plasma (ICP). Scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscope (AFM) are employed to characterize the morphology of the fabricated nanobeam cavities. The measured transmission spectra indicate that the Q factor of deeply-etched nanobeam cavities surpass 5×10^3 with acceptable insertion loss of less than -2 dB. These deeply-etched nanobeam cavities can find their applications in on-chip optical sensors or optical filters.

Key words integrated optics; photonic device; optical cavity; photonic crystal; periodic waveguide

OCIS codes 130.3120; 140.3945; 230.5298

1 引 言

光学微腔是一种极其重要和基本的光学元件,在激光、滤波器、光调制器、光开关、光学传感、光机械以及腔量子电动力学等领域皆有广泛的应用^[1]。光学微腔利用腔体介质结构对光波(光子)在空间和时间两个维度进行限制,实现对光的操控。反映光学微腔对光的时间限制和空间束缚能力的两个基本物理量是品质因子(Q 值)和模式体积(V 值)。在光学微腔的应用当中,一般都期望获得极大的 Q/V 值,以实现低阈值的激光、高灵敏度传感器和低功耗光开关等。

传统的基于分离元件光学微腔如法布里-珀罗腔、球形腔等可以获得大于 10^8 的 Q 值,但通常模式体积 V

收稿日期: 2015-01-27; 收到修改稿日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61405177)、浙江省自然科学基金(LY14F030013)、宁波市自然科学基金(2014A610150, 2013A610004)、福建省教育厅省属高校专项(JK2013053)、福建省中青年教师教育科研项目(JA13303)

作者简介: 喻平(1980—),男,博士,讲师,主要从事集成光电子技术方面的研究。E-mail:yuping@nit.zju.edu.cn

较大($1\sim 10^3 \mu\text{m}^3$)。并且由于分离结构微腔尺寸较大($>1 \text{mm}^2$),使得此类微腔的大规模集成应用受到限制。最近由于硅光子技术的迅速发展,利用成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺在高折射率对比(硅/空气)绝缘硅(SOI)上可制作出紧凑的光学器件^[2-3]。例如基于硅材料的耳语廊模类微腔如微盘、微碟和微环等高 Q 值($\sim 10^6$)微腔已有大量报道,此类微腔的模式体积为 $10\sim 10^2 (\lambda/n)^3$ 量级,其中 n 为有效折射率, λ 为真空光波长。光子晶体概念的提出为光学微腔的设计和制作提供了一个新思路,利用光子晶体特有的光子带隙特性,构造出含缺陷的周期结构以实现对光的局域和限制,可以同时获得极高 Q 值和极低 V 值 $[\sim (\lambda/n)^3]$ 的尺寸超紧凑($\sim \mu\text{m}^2$)光学微腔^[4]。由于CMOS工艺主要是一种平面的加工技术,制作出的平板光子晶体不具有完全带隙,因而需对平板光子晶体微腔缺陷处的晶格进行优化设计以减小微腔的损耗,故此类微腔对加工精度提出了较高要求,目前报道的平板光子晶体微腔的最高 Q 值为 10^6 。

在基于一维周期结构的周期波导中引入缺陷,可以形成周期波导光子晶体微腔。由于周期波导微腔具有和平板光子晶体微腔相当的 Q 值,更小的 V 值和更加紧凑的尺寸,其特有的波导结构更适合于和其他基于光波导的器件之间进行耦合连接,使其得到广泛关注和研究^[5-9]。周期波导微腔的 Q 值、 V 值和尺寸是在设计时需要综合考虑的主要参数,现有的高 Q 值设计方法通常导致较大的 V 值和较长的尺寸。例如,Quan等^[10]提出的固定晶格常数线性渐变周期单元小孔半径来构造高斯分布模场强度的方法,Desiatov等^[11]提出的抛物线渐变宽度和固定晶格常数的设计方法等,都能有效地减小由于完全光子带隙造成的辐射损耗,提高周期波导微腔的 Q 值。但上述设计方法不足的是缓变结构使微腔的长度增加,模式体积 V 增大,支持多个谐振模式而不能实现单模工作;同样由于周期单元数较多(通常单元数 $N>40$)引起较大的散射损耗使得实际制作出的微腔器件插入损耗过大。此外,另一种设计思路是提高折射率对比以增加对光的限制能力,例如通过采用湿法刻蚀去除二氧化硅衬底后形成空气桥结构(air bridge)^[12],其较大的相互作用空间有利于光传感等应用,但这样会造成微腔的机械强度下降,极易引起制作和封装过程中器件损坏失效。

本文研究了一种基于深刻蚀的少单元数周期波导微腔,采用微腔中央附近数个渐变晶格和深刻蚀衬底二氧化硅的方法来减小辐射损耗以获得较高 Q 值,从而保证微腔的机械强度、较低的插入损耗和紧凑的器件尺寸。采用平面波展开方法和时域有限差分方法分析和设计器件,利用电子束光刻(EBL)结合感应耦合等离子体(ICP)刻蚀制作出长度仅为 $6 \mu\text{m}$ 的硅周期波导微腔,实验测得微腔平均 Q 值高于 5.1×10^3 。

2 器件设计和模拟计算

2.1 周期波导分析

周期波导的基本单元为硅波导上刻蚀圆形孔构成,其横截面如图1所示,波导宽度 $w=1.07 a$,硅层高度 $h_{\text{silicon}}=0.49 a$,半径 $r=0.24 a$,其中 a 是晶格常数(单元长度)。采用平面波展开方法计算得到的周期波导色散关系如图2所示,减小圆孔半径使有效折射率增加导致空气带(第二条色散曲线)下降和带隙的缩小。为了比较深刻蚀对光子能带的影响,这里考虑了完全没有衬底二氧化硅影响(air bridge)、全刻蚀硅但不刻蚀二氧化硅材料(fully etched, $h_{\text{silica}}=0$)、采用深刻蚀去除掉部分二氧化硅(deeply etched, $h_{\text{silica}}=0.18 a$)三种情况。

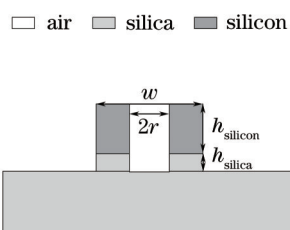


图1 硅周期波导的波导横截面图

Fig.1 Schematic of cross section of a SOI periodic

由图2可见,空气桥结构由于完全去除了衬底二氧化硅,波导芯区和包层折射率对比最大(硅/空气),其对应的带隙最宽,在布里渊区边界处的光子态远离空气包层对应的辐射模(灰色实线以上部分)。当考虑有衬底二氧化硅时,由于周期波导有效折射率的增加,色散曲线中的空气带(第二光子带)稍向下移(蓝色虚线),特别是在归一化波矢 $k_x a/2\pi < 0.35$ 时尤为明显。同时,由于二氧化硅材料的光锥线(light line)较空气的低,使得

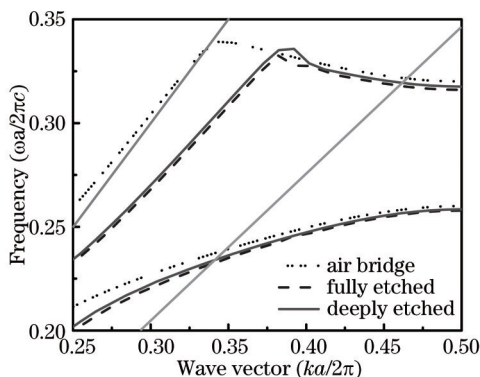


图2 硅周期波导的色散关系

Fig.2 Dispersion relation of the SOI periodic waveguide

带边光子态易耦合至光锥(light cone, 黄色实线)内辐射模。深刻蚀去除部分二氧化硅后的周期波导色散曲线介于这二者之间,光子带隙比空气桥结构的稍小。由此可以看到深刻蚀可以保证较大的光子带隙,但具有比空气桥结构更好的机械强度性能。

2.2 周期波导微腔的设计和模拟

由于周期波导不具有完全带隙,为了获得较高 Q 值并保证微腔有较小的尺寸,采用了渐变晶格的设计,如图3所示。圆孔半径也在 $0.2a \sim 0.25a$ 之间近似线性变化,总共由14个单元构成对称微腔结构。晶格常数和孔尺寸均由微腔中央处 a_1, r_1 向两侧渐变增大至 a_4, r_4 ,形成缓变缺陷以减小由于不完全光子带隙结构中突变缺陷固有的模式失配引起的损耗。另外在腔两侧使用减小晶格尺寸和圆孔半径,以减小微腔和波导耦合的插入损耗。使用时域有限差分(FDTD)方法对微腔结构进行优化,微腔的具体尺寸参数设计如表1所示。

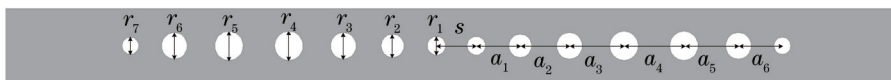


图3 周期波导微腔的平面结构示意图

Fig.3 Schematic of the designed periodic waveguide nanobeam cavity (bird view)

表1 周期波导微腔的设计参数及数值(单位: nm)

Table 1 Parameters and values of designed periodic waveguide nanobeam cavities (units: nm)

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	s	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
69	86	97	107	107	97	63	280~320	330	370	410	450	410	330

为使设计的周期波导微腔具有一定的工艺容差范围,采用一组变长 s 参数(表1中所示从280 nm到320 nm每10 nm递增)。使用FDTD方法计算了所设计的周期波导微腔的 Q 值和谐振波长随 s 参数的变化,结果如图4所示。对于无二氧化硅衬底的空气桥结构周期波导微腔,其谐振波长随 s 的增大从1520 nm增加到1540 nm。对于同样结构参数的全刻蚀周期波导微腔($h_{\text{silica}}=0$),由于二氧化硅衬底的出现使得有效折射率增大,导致谐振波长红移,随 s 的增大从1523 nm增长到1560 nm。在所计算的 s 范围内,品质因子 Q 在从4500~2300之间变化。衬底二氧化硅的出现将会大大减小 Q 值,其原因是由于二氧化硅折射率比空气的折射率要高,使得谐振模更容易耦合到光锥(light cone)中形成辐射模。值得说明的是,此处设计的 Q 值(4×10^3)虽然小于目前报道的超高 Q 值(10^5),但考虑到由于目前工艺水平,以及周期波导微腔用作传感用途时 Q 值还会受待测物如水的吸收损耗的影响($\sim 10^4$),却具有器件尺寸极其紧凑和支持单模工作的优点。

由于深刻蚀的周期波导微腔在 z 方向是不对称的,而空气桥结构在 z 方向仍是对称的,因此一般来说计算深刻蚀周期波导所花时间要比空气桥结构多一倍以上。有意义的是,从图4中可以看到,同样结构参数而采用深刻蚀($h_{\text{silica}}=80$ nm)周期波导微腔显示出和空气桥型结构类似的特性,即谐振波长和品质因子十分接近。这一特性使得在进行器件设计时可大大减小计算模拟所需时间,只需采用空气桥型对称结构的计算结果即可指导深刻蚀周期波导微腔的器件设计。

图5给出了FDTD方法计算的 $s=300$ nm, $h_{\text{silica}}=80$ nm时周期波导微腔谐振模的模场 E_y 分量(TE模, $z=0, y=0$ 平

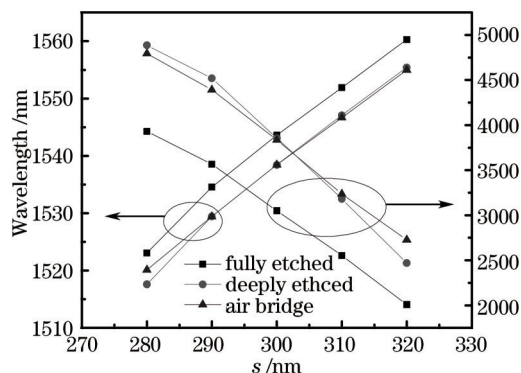


图4 谐振波长和微腔 Q 值随结构参数 s 的变化关系

Fig.4 Resonant wavelength and Q factor as functions of s

面)典型分布图,对应的谐振波长为 1548.2 nm,图中白色虚线为周期波导微腔结构轮廓。由图 5(a)可知,该谐振模式是关于 x 轴和 y 轴偶对称的基模,谐振模的相当大部分能量位于空气孔(白色虚线圆圈)当中,与图 2 所示的周期波导的空气带带边模式对应,是一种靠近空气带边的空气缺陷模(air modes)。计算表明该谐振模的模式体积 V 值仅为 $3.1(\lambda/2n)^3$,小于 2010 年报道的高 Q 值周期波导微腔^[10-11],极其适合于传感等应用。从图 5(b)亦可以观察到,由于采用了深刻蚀,衬底二氧化硅对谐振模在垂直方向(z 方向)分布的影响较少,近似于空气桥结构情况时的 z 方向对称分布。

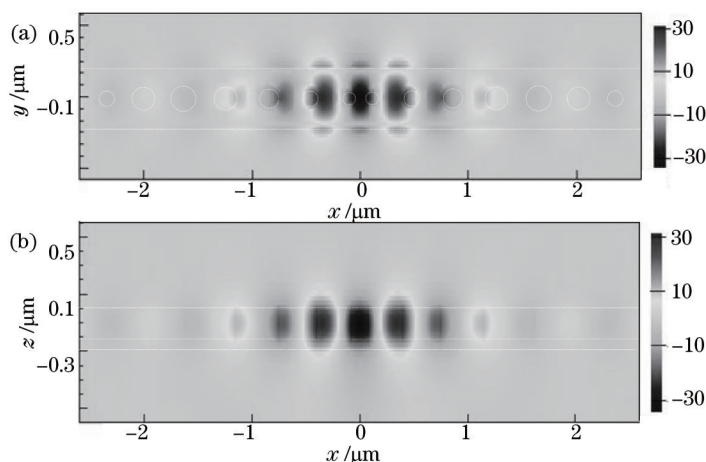


图 5 TE 谐振模基模的模场 E_x 分布($h_{\text{silica}}=80$ nm)。 (a) $z=0$; (b) $y=0$

Fig.5 Mode profiles of E_x of the TE resonant mode $h_{\text{silica}}=80$ nm. (a) $z=0$; (b) $y=0$

3 实验和讨论

3.1 器件制作及形貌表征

设计的深刻蚀的周期波导微腔制作在 SOI 硅片上,其顶层硅厚度为 220 nm,衬底氧化层的厚度为 $3 \mu\text{m}$ 。实验中采用电子束光刻(Vistec EBPG 5000 Plus)直写器件图形,所使用的光刻胶为 ZEP520A。在定义好器件图形后通过感应耦合等离子体干法刻蚀(ICP 使用 SF_6 和 C_4F_8 混合气体)将图形转移到 SOI 硅片上。最终制作出的周期波导微腔的典型形貌如图 6 的扫描电子显微镜(SEM)照片所示。由于工艺偏差,由 SEM 照片中测量到的结构参数和所设计的参数值有一定出入,考虑 SEM 测量长度本身的误差,工艺误差基本上在 10 nm 左右。整个周期波导微腔尺寸极其紧凑,长度不到 $6 \mu\text{m}$,制作的器件实物结构尺寸和所设计的微腔器件结构参数基本一致。

为了确认制作过程中 ICP 刻蚀的时间是否足够充分以保证深刻蚀结构制作成功,采用原子力显微镜(AFM)对器件的刻蚀深度信息进行了测量,其结果如图 7 所示。尽管由于受测量噪声的影响,在波导刻蚀界面处有较大的测量误差。但从图 7(a)可见,刻蚀的平均深度(两条标记的红色虚线之间深度)约为 300 nm,即通过深刻蚀去除的二氧化硅衬底部分约为 80 nm,达到了器件设计的预期参数值。图 7(a)~(b)中波导界面处

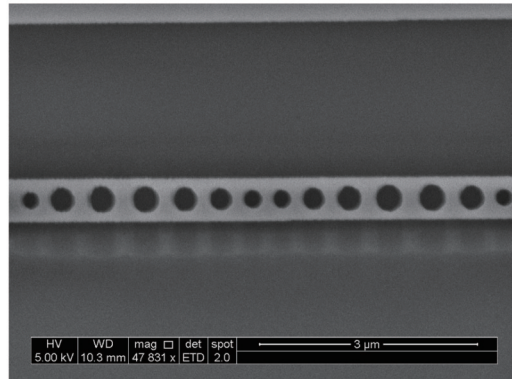


图6 周期波导微腔的SEM照片

Fig.6 SEM image of the fabricated periodic waveguide nanobeam cavity

的深度值突变,提示由于制作工艺水平的影响,使该处边界不够平滑,将可能引起较大的散射损耗。为了提高实际制作的周期波导微腔 Q 值,还需要采用湿法氧化等方法进一步对波导边界进行处理^[2]。

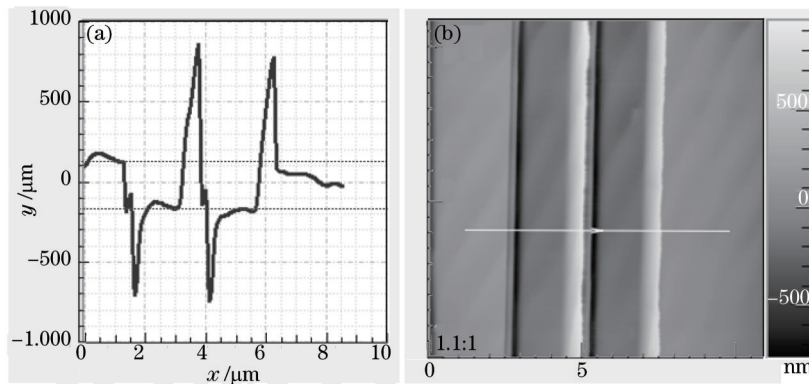


图7 周期波导微腔的刻蚀深度AFM表征图

Fig.7 AFM images of the fabricated periodic waveguide cavity

3.2 微腔的光谱响应

由于周期波导微腔本身是一个波导结构,因而在其两端直接设计了单模波导实现光信号的输入和输出,最后两端经长约 $300 \mu\text{m}$ 的绝热渐变波导过渡到宽度为 $10 \mu\text{m}$ 的波导光栅实现和输入输出光纤的垂直耦合^[5]。宽带光源($1520\sim 1570 \text{ nm}$)经光纤耦合至芯片上的周期波导微腔,再经另一光纤耦合输出到光谱仪,测得的典型透射光谱如图8所示。从谱线的洛伦兹拟合得到的 Q 值如图8中所示,图中 λ 为谐振中心波长,

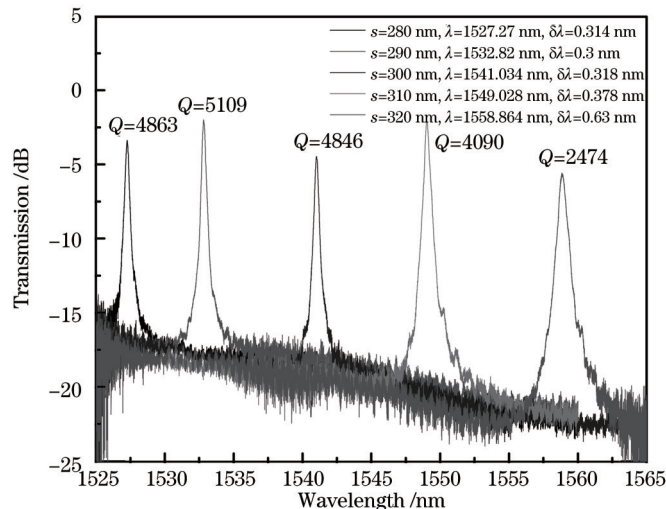


图8 实验测得的周期波导微腔的传输光谱

Fig.8 Measured transmission spectra of the fabricated periodic waveguide cavities

$\delta\lambda$ 为谐振峰半峰全宽(FWHM)。谐振波长和 Q 值随 s 参数的变化趋势和数值范围基本和数值计算结果吻合。谐振波长与计算值的差异主要源自制作工艺不理想引起的结构尺寸偏差,而测得的 Q 值和计算值非常接近。在 $s=290\text{ nm}$ 的器件中,测得的 Q 值超过了 5×10^3 ,插入损耗为 -1.96 dB ,远远小于2013年报道的高 Q 值周期波导微腔的插入损耗^[5]。随着波长增加微腔透射损耗亦变大,但谐振点整体的消光比大于 15 dB ,能够满足一般的传感和粗波分复用滤波器应用。测试多批器件发现, Q 值基本能保持 $4000\sim 5000$ 左右,因而所采用的设计和制作方法具有较强的工艺容差特性。由于渐变晶格设计需进行结构优化,因而采用渐变晶格的紧凑型周期波导微腔的 Q 值设计还有很大的空间,将在后继工作中进行深入研究。

4 结 论

设计和制作了一种深刻蚀的硅基周期波导微腔。采用深刻蚀衬底二氧化硅和使用少单元数渐变晶格的设计方法能有效获得较高的模式限制能力,同时保持周期波导微腔的机械强度和紧凑尺寸。实验表明当刻蚀深度为 80 nm ,长度为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 周期波导微腔的 Q 值超过 5×10^3 ,插入损耗约 -2 dB 。研究的硅周期波导微腔具有结构紧凑、模式体积和插入损耗低、 Q 值较高的特点,此类微腔将在集成片上传感器和滤波器等领域得到应用。

参 考 文 献

- 1 Vahala K J. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424(6950): 839-846.
- 2 Reed G T, Knights A P. Silicon Photonics: An Introduction[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd Press, 2004: 91-92.
- 3 Yu Ping, Jiang Xiaoqing, Yang Jianyi, *et al.*. Minimum mode spot size in a three-layer dielectric optical waveguide[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3530-3536.
喻平, 江晓清, 杨建义, 等. 三层介质平板光波导的最小模斑尺寸[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3530-3536.
- 4 Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, *et al.*. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light[M]. New Jersey: Princeton University Press, 2008: 1-10.
- 5 Yu P, Qiu C, Hu T, *et al.*. High- Q Photonic crystal cavity in a single-mode silicon ridge waveguide[J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(10): 104204.
- 6 Yu P, Qi B, Xu C, *et al.*. An improved surface-plasmonic nanobeam cavity for higher Q and smaller V [J]. Chinese Sci Bull, 2012, 57(25): 3371-3374.
- 7 Yu P, Qi B A, Jiang X Q, *et al.*. Ultrasmall- V high- Q photonic crystal nanobeam microcavities based on slot and hollow-core waveguides[J]. Opt Lett, 2011, 36(8): 1314-1316.
- 8 Yu P, Hu T, Qiu H Y, *et al.*. Fano resonances in ultracompact waveguide Fabry-Perot resonator side-coupled lossy nanobeam cavities[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(9): 091104.
- 9 Yu P, Hu T, Qiu C, *et al.*. Ultracompact, reflection-free and high-efficiency channel drop filters based on photonic crystal nanobeam cavities[J]. Chin Phys Lett, 2013, 30(3): 034210.
- 10 Quan Q M, Deotare P B, Loncar M. Photonic crystal nanobeam cavity strongly coupled to the feeding waveguide[J]. Appl Phys Lett, 2010, 96(20): 203102.
- 11 Desiatov B, Goykhman I, Levy U. Parabolic tapered photonic crystal cavity in silicon[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(4): 041112.
- 12 Pernice W H P, Xiong C, Schuck C, *et al.*. High- Q aluminum nitride photonic crystal nanobeam cavities[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(9): 091105.

栏目编辑: 张浩佳