

Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ 硫基光子晶体平板波导的宽带慢光特性研究

韩金涛 张 巍 魏凤娟 王贤旺 章 亮 张培晴 戴世勋

宁波大学高等技术研究院红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211

摘要 通过改变最内层两排空气孔的半径,研究了 Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ 硫基光子晶体平板波导的宽带慢光特性。利用三维平面波展开法,通过计算得到波导的能带结构、群折射率和色散,并分析了它们与内层空气孔半径大小的关系。同时优化第一层和第二层空气孔的半径大小,得到了群速度色散为零的对称型硫系光子晶体波导结构,并在20%的变化范围内获得大小分别为125、40和18的群折射率,对应通信波长处的带宽分别为1.7、5.6、9.7 nm,并讨论了折射率对光子晶体波导慢光性能的影响。并为高非线性、低色散的宽带慢光硫基光子晶体平板波导器件的设计及制备提供了理论基础。

关键词 集成光学; 光子晶体波导; 硫系玻璃; 慢光; 非线性光学; 光学设计

中图分类号 O734; TN252 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0606002

Investigation of Wideband Slow Light in Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ Photonic Crystal Slab Waveguides

Han Jintao Zhang Wei Wei Fengjuan Wang Xianwang Zhang Liang

Zhang Peiqing Dai Shixun

Laboratory of Infrared Material and Devices, Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract The slow light propagation in a Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ chalcogenide photonic crystal slab waveguide (PCSW) of air holes is investigated via the three-dimensional plane wave expansion (PWE) method. By perturbing the first two rows of air holes adjacent to the waveguide core, the group index, the bandwidth and the dispersion can be tuned effectively, and the symmetric chalcogenide photonic crystal slab waveguides with zero dispersion are obtained. The slow lights with the group indices of 125, 40, and 18 are demonstrated, with the bandwidths of 1.7, 5.6 and 9.7 nm, respectively. Finally, the effects of refractive index of chalcogenide materials on the slow light in the photonic crystal slab waveguide are discussed. It shows perfect slow-light properties in chalcogenide PCSWs and can be used as an affordable reference for further research in chalcogenide photonic crystal waveguide devices.

Key words integrated optics; photonic crystal waveguides; chalcogenide glass; slow light; nonlinear optics; optical design

OCIS codes 160.5298; 130.5296; 160.2750; 230.4320

1 引 言

光子晶体平板波导(PCSWs)是由光子晶体平板和线缺陷组成的新型光学波导结构,它较传统的平板波

收稿日期: 2014-12-24; 收到修改稿日期: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(61107047)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队(2009B21007)、宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 韩金涛(1990—),男,硕士研究生,主要从事硫系光子晶体波导制备和特性等方面的研究。E-mail: hji0829@163.com

导师简介: 张 巍(1979—),男,副研究员,主要从事红外硫系玻璃微结构器件方面的研究。E-mail: zhangwei3@nbu.edu.com

导有许多优点^[1-7],其中较显著的优点是PCSWs的慢光效应(较小的群速度或较大的群折射率)。慢光效应能够增强光与物质的相互作用,提高介质的非线性效应,可应用于光学延迟线、光存储和全光缓存以及高非线性光学器件等领域^[8-11]。作为获取慢光效应最实用的一种方法^[11-13],PCSWs具有许多优点,如在室温下工作、群速度和带宽可调、任意工作波长等。

目前的PCSWs多用硅基或GaAs材料制备而成,然而由于材料本身的缘故,它们的慢光加强非线性效应有一定的限制,不利于高非线性器件的实际应用。解决该问题的方法是引入高非线性的硫系玻璃材料。硫系玻璃是氧元素除外的第VI主族元素(S, Se, Te)同电负性较弱的As、Sb、Ge等形成的非晶化合物,例如As₂S₃、Ge-As-Se和Ge-Sb-Te等。硫系玻璃具有较宽的中红外透过光谱(0.8~20 μm)^[14-16]、较高的材料折射率($n=2\sim 3$)、超高的非线性折射率($n_2=2\times 10^{-18}\sim 20\times 10^{-18}$ m²/W^[15-16],高出石英材料2~3个数量级)和超快的非线性响应时间($t_r<200$ fs)以及可忽略的光生载流子效应等特性^[17-19]。以硫系玻璃为基质的PCSWs作为一种新型的高非线性波导结构,已经引起了国外许多著名的光电子研究机构的极大的研究兴趣^[20-22]。近年来的报道表明了硫基PCSWs在慢光加强非线性方面较普通的硫基平板波导或硅基波导具有更大的优势^[20-23]。

为了获得显著的非线性效果,一般需要数值较大的群折射率。在PCSWs中,群折射率增大的同时往往伴随着带宽的减小以及群速度色散(GVD)的增大,这些都不利于慢光的实际应用。为了获得低色散、宽带慢光,目前的方法主要是改变数排孔洞的半径大小、位置、折射率和形状等^[24-27]。目前已报道的硫基PCSWs的研究中,其材料基质主要集中在As₂S₃、Ge-As-Se等含有毒As元素的玻璃材料,研究的结构主要是普通W1型PCSWs^[20-23],而对无As环保型的低色散、宽带慢光型硫基PCSWs的研究则报道较少。考虑到材料的安全环保以及研究的简易性,本文通过熔融淬冷法^[28]制备了一种不含As元素的环保型Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅玻璃,利用磁控溅射法制备成硫基薄膜^[29],以此为PCSWs的基质,并利用平面波展开法研究了波导两侧各两排孔洞大小对硫基PCSWs的低色散、宽带慢光特性的影响,在通信波长处获得了可调色散零点的宽带慢光PCSWs结构。

2 理论分析

本文研究的硫基PCSWs的立体结构如图1(a)所示。波导平板是一层Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅薄膜,上下包层都为空气(这种结构的光子晶体波导一般也称为空气桥型波导)。平板层由空气孔型三角晶格光子晶体和一条线缺陷(即一排空气孔被填充)组成,线缺陷沿光子晶体的 ΓK 方向,其最近邻的两排对称空气孔半径 r_t 和 r_s 被改变以产生低色散宽带慢光。光子晶体的晶格周期为 $a=600$ nm(a 的值要根据实际的工作波长和具体结构的中心频率确定,本文中 $\lambda=1550$ nm),空气孔半径为 $r=0.3a$,薄膜厚度为 $h=0.5a$,薄膜折射率为 $n=2.7$ ^[16],波导工作波长为通信波长 $\lambda=1550$ nm。 r_t 和 r_s 的范围设置为 $0.2a\sim 0.4a$,这样的波导结构能够得到较好的慢光特性,且易于今后的制备。

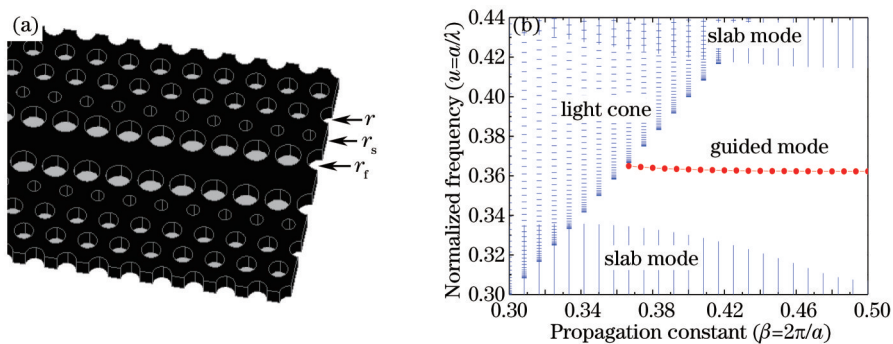


图1 (a) 硫基PCSWs结构图;(b)标准W1型PCSWs的导模色散曲线图

Fig.1 (a) Schematic diagram of the Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ structure; (b) calculated dispersion curve of the guided mode in standard PCSW

利用三维平面波展开法(3D-PWE)计算硫基PCSWs的类横电(TE)模的色散关系。图1(b)显示了 $r_t=r_s=0.3a$ 时的波导类TE导模(即光子晶体的TE缺陷模式)的色散关系 $u(\beta)$,其中横轴代表传播常数 β ,纵轴代表归一化频率 $u=a/\lambda$ 。波导导模在水平方向上受到光子晶体禁带效应的影响,显示在图中则是其位置处于平板模式带隙之中,在竖直方向上受到全反射的限制,在图中即处于光锥之下,这样,其最终的传输损耗将比只

受全反射限制的普通平板波导要小。根据所得的色散曲线,可以计算导模的群速度^[30]:

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \frac{2\pi c}{a} \frac{du}{d\beta}, \quad (1)$$

式中 ω 是圆频率, c 是真空中光速。通过(1)式,可以导出群折射率

$$n_g = \frac{c}{v_g} = \frac{a}{2\pi} \frac{d\beta}{du}. \quad (2)$$

一定频率带宽内的 n_g 并非常数,而是有一定的起伏,起伏的大小一般设置为20%^[27,31]。要获取慢光,即需要较大数值的 n_g 。通过优化, n_g 的大小可高达到数百^[25]。群色散系数 β_2 用来表征波导脉冲畸变的程度,可以用传播常数对频率的二阶导数表示:

$$\beta_2 = \frac{d^2\beta}{d\omega^2} = \frac{a}{2\pi c^2} \frac{dn_g}{du}. \quad (3)$$

低色散的硅基慢光波导的群色散系数 β_2 一般在 $10^8 \text{ ps}^2/\text{km}$ 以内^[27,30,32]。为了综合评价宽带慢光的性能,归一化的延迟带宽积(NDBP)经常被使用,即

$$P_{\text{NDBP}} = \bar{n}_g \times \frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \quad (4)$$

式中 \bar{n}_g 是一定带宽内的平均群折射率, $\Delta\omega/\omega_0$ 是相对带宽, $\Delta\omega$ 是绝对带宽, ω_0 是频带中心频率,相对带宽是有意义的物理量,下文中无特殊说明的“带宽”皆指相对带宽。硅基光子晶体波导的NDBP大小一般为0.1~0.4^[25,32-33]。

3 模拟计算

3.1 改变 r_t

研究了紧邻波导的第一排空气孔的半径 r_t 的变化对波导的色散关系和慢光特性的影响,计算的结果分别如图2(a)和图2(b)所示。从图2(a)中可以看到,随着 r_t 从 $0.2a$ 逐渐增大到 $0.4a$,导模的色散曲线逐渐从低频向高频移动,可能带来逐渐变小的相对带宽。另外, $r_t=0.35a$ 时,色散曲线较平坦,当 r_t 的数值大小远离 $0.35a$ 时,对应的色散曲线的斜率数值逐渐变小,即群折射率逐渐变小。图2(b)显示了 r_t 在 $0.2a\sim 0.4a$ 范围内时导模的群折射率。 $r_t=0.3a$ 时,波导的群折射率较大,但其群折射率曲线没有极值点即没有零色散点(注意,色散零点应该通过群折射率 n_g 随频率 ω 的变化曲线获得,但可以通过 n_g 随传播常数 β 的变化曲线定性分析,这样较快捷方便),这样的波导将产生较大的色散。 $r_t=0.35a$ 时波导出现零色散点,且拥有较大的群折射率,约为80。当 r_t 远离 $0.35a$ 而为 $0.2a$ 或 $0.4a$ 时,导模的相对带宽有一定的增大,但其群折射率却降至20左右, $r_t=0.4a$ 时波导出现了不太明显的色散零点。

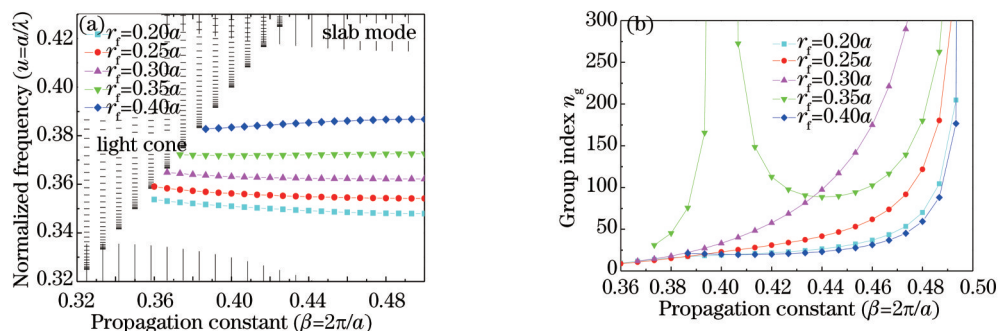


图2 (a) 导模色散随 r_t 变化图; (b) 群折射率随 r_t 变化图

Fig.2 (a) Curves of the waveguide modes for different values of r_t ; (b) curves of the group index for different values of r_t

3.2 改变 r_s

固定 $r_t=r=0.3a$,改变紧邻波导第二排空气孔的半径 r_s 的大小,可以得到与单独改变 r_t 时相似的色散关系和慢光特性,如图3所示。在图3(a)中,随着 r_s 从 $0.2a$ 逐渐增大到 $0.4a$,导模的色散曲线逐渐从低频移向高频,其移动幅度明显较图2(a)中的小,说明 r_s 的改变对导模的影响较弱,可作为微调方法。与图2(a)的规律相

似,当 $r_s=0.35a$ 时,色散曲线较平坦,当 r_s 远离 $0.35a$ 时,对应的色散曲线的斜率数值逐渐变小,即群折射率逐渐变小。图3(b)显示了 r_s 在 $0.2a\sim 0.4a$ 范围内导模的群折射率。 $r_s=0.3a$ 时,波导的群折射率较大,在曲线较平坦的区域内约为80,但不存在明显的色散零点。 $r_s=0.35a$ 时波导出现零色散点,且拥有大小约为60的群折射率,较 $r_s=0.3a$ 时略小。当 r_s 远离 $0.35a$ 而为 $0.2a$ 或 $0.4a$ 时,导模的相对带宽有一定的增大,同时其群折射率降至20左右, $r_s=0.4a$ 时波导出现明显的色散零点。

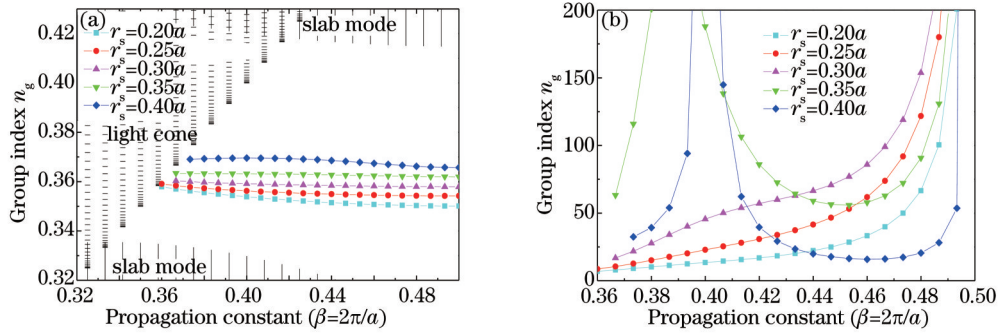


图3 (a) 导模色散随 r_s 变化图; (b) 群折射率随 r_s 变化图

Fig.3 (a) Curves of the waveguide modes for different values of r_s ; (b) curves of the group index for different values of r_s .

3.3 同时改变 r_r 和 r_s

为了尽可能获得满足不同需要的低色散宽带慢光波导结构,可以同时改变 r_r 和 r_s 的大小。从上面的分析中可以看到, r_r 或 $r_s=0.35a$ 时,波导有较优良的慢光特性; r_s 或 $r_r=0.3a$ 时,波导的群折射率相对较大,但无明显的色散零点; r_r 或 $r_s=0.4a$ 时,波导群折射率较小,但相对带宽较大,且出现了色散零点。因此可以选择 $r_r=0.3a$ 、 $r_s=0.4a$ 或 $r_r=0.4a$ 、 $r_s=0.3a$ 的波导参数进行模拟研究,以期获得低色散宽带慢光。经过大量计算, $r_r=0.3a$ 、 $0.35a$ 和 $0.4a$,相应的 $r_s=0.4a$ 、 $0.35a$ 和 $0.3a$ 这三种情况的波导结构(优化波导)可以提供满足不同需求的低色散宽带慢光特性。

图4显示以上三种结构参数下的波导模式和群折射率,为了更好地说明优化后波导的慢光特性,普通波导($r_r=r_s=0.3a$)的导模和群折射率也显示在图中。从图4(a)中可以看到,导模曲线较平坦,即群折射率较大,且几乎处于平板模式禁带中间位置,不容易泄露进波导两侧的光子晶体结构中,侧向损耗较小。图4(b)较粗略地显示了优化后波导的群折射率、带宽和色散。与其他两种情况相比,参数 $r_r=r_s=0.35a$ 的波导拥有较大的群折射率和相对较小的带宽,具体参数如图5所示。

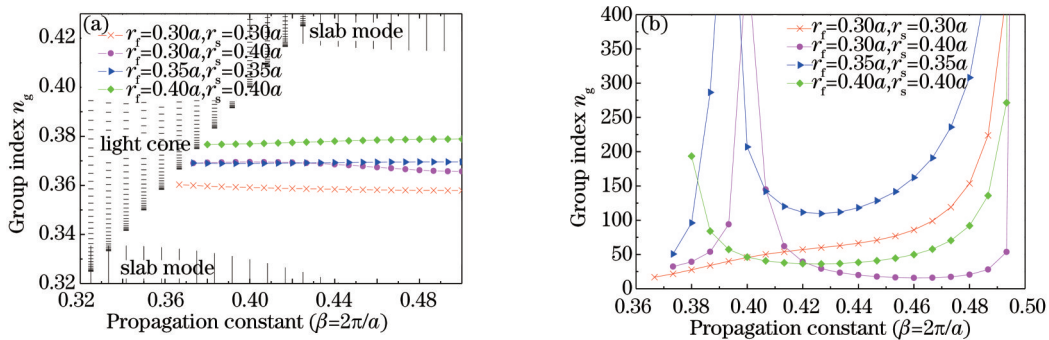


图4 (a) 三种优化波导导模色散图; (b) 波导的群折射率图

Fig.4 (a) Curves of the dispersion of three optimized PCSWs; (b) curves of the group index of three optimized PCSWs

图5显示了三种优化情况的波导在通信波长处的慢光性能曲线,其中带宽是在以色散零点为中心和群折射率的波动范围为20%的情况下取得的。从图5(a)中可以看到, $r_r=0.3a$ 和 $r_s=0.4a$ 时(Case 1),波导群折射率为18,带宽为9.7 nm,NDBP为0.11,群速度色散小于 10^7 ps²/km;在图5(b)中, $r_r=0.4a$ 以及 $r_s=0.3a$ 时(Case 2),波导群折射率为40,带宽为5.6 nm,NDBP为0.15,群速度色散小于 5×10^7 ps²/km;图5(c)中, $r_r=0.35a$ 以及 $r_s=0.35a$ 时,波导群折射率为125,带宽为1.7 nm,NDBP为0.14,群速度色散小于 1×10^8 ps²/km(Case 3)。可以看到,随着群折射率的增大,带宽逐渐减小,群速度色散逐渐增大,这是已报道的光子晶体慢光特性的基本规律。

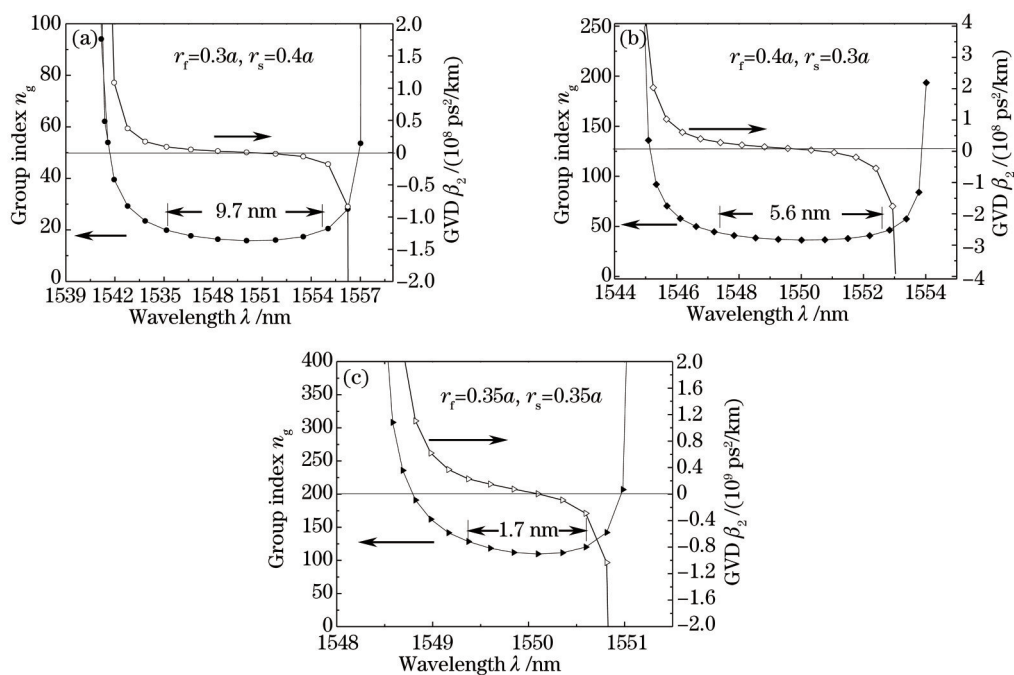


图5 三种优化波导群折射率和群速度色散随λ变化曲线

Fig.5 Group index and GVD as a function of wavelength λ for three optimized PCSWs

为了比较硫基和硅基 PCSWs 慢光特性的差异,相关性能参数显示在表 1 中^[24,31-32]。从表中可以看到,硫基光子晶体的 NDBP 普遍较硅基的小,这与硫基材料的折射率相对较小有关,详细分析见“讨论”部分。

表 1 硫基与硅基 PCSWs 慢光特性的比较

Table 1 Comparison of slow light properties between chalcogenide and silicon PCSWs

	Ref[21]	Ref[29]	Ref[16]	Case 1	Case 2	Case 3
Group index	151	34	90	18	40	125
Bandwidth	2.4	11	6.4	9.7	5.6	1.7
NDBP	0.25	0.24	0.35	0.11	0.15	0.14

4 讨 论

这里主要讨论平板折射率的改变如何影响波导慢光特性,通过计算证明了硫基 PCSWs 由于折射率相对较小,其慢光参数 NDBP 小于硅基波导的 NDBP,故提出了提高硫基 PCSWs 归一化延迟带宽积的方法。令 $r_r=0.4a, r_s=0.3a$, 改变平板折射率的值,使其从 2.6 增大到 3.4, 对应的波导色散曲线和群折射率如图 6 所示。从图 6(a)中可以看到,随着平板折射率的增大,波导导模的归一化中心频率从 0.39 减小到 0.31。根据(4)式可知, NDBP 与 ω_0 成反比,若 n_g 和 $\Delta\omega$ 不变或变化不大, NDBP 就会随着平板折射率的增大而增大。为了更清楚地显示这一变化规律,绘制了图 6(b), 图中清楚地显示了平板折射率 n 取不同值时波导的群折射率和通信波长处的带宽大小。此时(4)式可改写为

$$P_{\text{NDBP}} = \bar{n}_g \times \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}, \quad (5)$$

式中 $\lambda_0=1550 \text{ nm}$, $\Delta\lambda$ 为波导在 λ_0 处的绝对带宽。从图中可以看到,波导群折射率随平板折射率 n 变化不大,几乎为常数,而绝对带宽 $\Delta\lambda$ 则随着 n 的增大而增大。这样可以得到结论:平板折射率 n 的改变并不影响 PCSWs 的群折射率 n_g , 而只是影响它的带宽,并且随着 n 的增大,带宽增大,最终 NDBP 将会增大。

硅基材料的折射率在通信波长处一般为 3.4, 图 6(b)中显示了平板折射率 $n=3.4$ 时波导的群折射率 $n_g=37$, 绝对带宽 $\Delta\lambda=8.3 \text{ nm}$ 。利用(5)式可以得到波导的归一化延迟带宽积 $P_{\text{NDBP}}=0.20$ 。参数 $r_r=0.4a$ 以及 $r_s=0.3a$ 时的硫基 PCSWs 的 $P_{\text{NDBP}}=0.15$, 比所得硅基波导的参数小。由于材料折射率相对较小,在同种优化条件下,硫基 PCSWs 的慢光评价参数 P_{NDBP} 小于硅基波导。为了弥补这一缺陷,可以通过控制溅射功率和溅射气压

(溅射气为 Ar 气)来提高硫基薄膜的折射率进而提高硫基 PCSWs 的 NDBP。图 7 显示了硫基薄膜的折射率随磁控溅射功率 P_w 和气压 p 的变化曲线图。可以看到,提高功率或降低气压都能够提高薄膜的折射率,一般可以提高到 2.9。从图 6(b)中可以得到 $n=2.9$ 时的 $n_g=38.3$, 带宽 $\Delta\lambda=7.1$ nm, $P_{NDBP}=0.18$, 已经接近于硅基波导 NDBP 值。

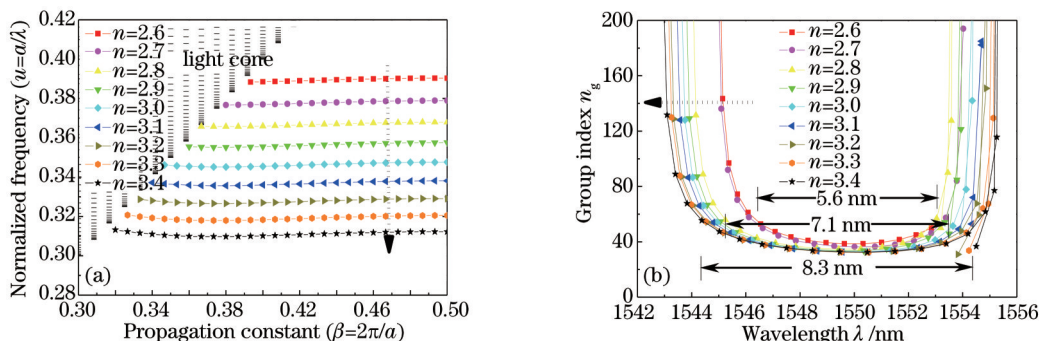


图 6 (a) 导模色散曲线随 n 变化图; (b) 群折射率随 n 变化图

Fig.6 (a) Curves of the waveguide modes for different values of n ; (b) curves of the group index for different values of n

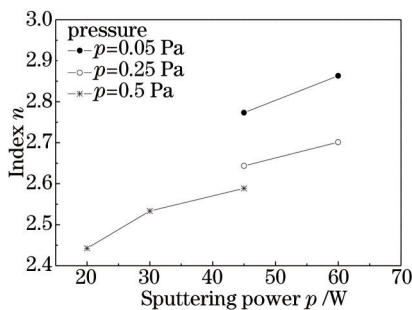


图 7 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 薄膜折射率随磁控溅射功率和气压的变化关系曲线图

Fig.7 Index of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ film with different sputtering powers P_w and Ar pressures p

通过提高薄膜折射率,硫基 PCSWs 的慢光性能可以接近硅基波导,而硫基材料本身的非线性性能比硅基材料要优良得多^[19,23]。综合而言,宽带慢光硫基 PCSWs 将在高非线性器件方面有着极大的应用前景。

5 结 论

提出了一种不含 As 元素的环保型 $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 玻璃基质的 PCSWs, 利用平面波展开法研究了波导两侧各两排孔洞大小对硫基 PCSWs 的低色散、宽带慢光特性的影响。在通信波长处获得了存在色散零点的宽带慢光硫基 PCSWs 结构,并在 20% 的变化范围内获得大小分别为 125、40 和 18 的群折射率,对应通信波长处的带宽分别为 1.7、5.6、10 nm,归一化延迟带宽积在 0.11~0.15 范围内。最后的结果与之前报道的硅基光子晶体波导的慢光参数进行了比较,相对较小的平板折射率一定程度上限制了硫基 PCSWs 的慢光性能,但通过提高制备工艺相关参数可以一定程度上缩短硫基与硅基 PCSWs 慢光性能间的差距。该研究将为高非线性、低色散的宽带慢光硫基 PCSWs 器件的设计及制备提供理论基础。

参 考 文 献

- 1 Qu Lianjie, Yang Yue, Huang Yongzhen. Slow-light characteristics of photonic crystal waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 113002.
- 曲连杰, 杨跃, 黄永箴. 光子晶体波导慢光特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 113002.
- 2 Li Zhiyuan, Gan Lin. Two-dimensional silicon photonic crystal slab devices[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900119.
- 李志远, 甘霖. 二维硅基平板光子晶体器件[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900119.
- 3 Y Zhang, Z Li, B Li. Multimode interference effect and self-imaging principle in two-dimensional silicon photonic crystal waveguides for terahertz[J]. Opt Express, 2006, 14(7): 2679-2689.
- 4 C Monat, B Corcoran, M Ebnali-Heidari, et al.. Slow light enhancement of nonlinear effects in silicon engineered photonic crystal

- waveguides[J]. *Opt Express*, 2009, 17(4): 2944–2953.
- 5 C Husko, T D Vo, B Corcoran, *et al.*. Ultracompact all-optical XOR logic gate in a slow-light silicon photonic crystal waveguide[J]. *Quantum Electronics Conference & Lasers and Electro-Optics (CLEO/IQEC/PACIFIC RIM)*, 2011, 19(21): 20681–20690.
- 6 Y Zhao, Y Zhang, Q Wang. High sensitivity gas sensing method based on slow light in photonic crystal waveguide[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 173: 28–31.
- 7 Zhang Wei, Wang Zhiyong, Wang Wenchao, *et al.*. Investigation on wideband slow light based on photonic-crystal coupled waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0213001.
张 伟, 王智勇, 王文超, 等. 基于光子晶体耦合波导的宽带慢光研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0213001.
- 8 T Baba. Slow light in photonic crystals[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 465–473.
- 9 T F Krauss. Slow light in photonic crystal waveguides[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(9): 2666.
- 10 Zhou Xingping, Shu Jing, Lu Binjie, *et al.*. Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123001.
周兴平, 疏 静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振器的双通道解波分复用器[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123001.
- 11 Y A Vlasov, M O'Boyle, H F Hamann, *et al.*. Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides[J]. *Nature*, 2005, 438(7064): 65–69.
- 12 M D Lukin, A Imamoglu. Controlling photons using electromagnetically induced transparency[J]. *Nature*, 2001, 413(6853): 273–276.
- 13 M S Bigelow, N N Lepeshkin, R W Boyd. Observation of ultraslow light propagation in a ruby crystal at room temperature[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90(11): 113903.
- 14 Wang Xianwang, Zhang Wei, Zhang Liang, *et al.*. Research progress of fabrication of chalcogenide glass photonic crystal waveguide [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(12): 120001.
王贤旺, 张 巍, 章 亮, 等. 硫系玻璃光子晶体光波导的制备研究发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(12): 120001.
- 15 Zhang Liang, Zhang Wei, Nie Qiuhua, *et al.*. Research progress of tow-dimensional photonic crystal waveguide[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 030008.
章 亮, 张 巍, 聂秋华, 等. 二维光子晶体波导研究进展[J]. *激光与光子学进展*, 2013, 50(3): 030008.
- 16 Liu Shan, Shen Xiang, Xu Tiefeng, *et al.*. Dispersion characteristics of $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ chalcogenide rib waveguide[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0513001.
刘 珊, 沈 祥, 徐铁峰, 等. $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫系脊形光波导的色散特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0513001.
- 17 A B Seddon. Chalcogenide glasses: A review of their preparation, properties and applications[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, 184: 44–50.
- 18 F Smektala, C Quemard, V Couderc, *et al.*. Non-linear optical properties of chalcogenide glasses measured by Z-scan[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 274(1): 232–237.
- 19 A Zakery, S R Elliott. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: A review[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 330(1): 1–12.
- 20 C Monat, M Spurny, C Grillet, *et al.*. Third-harmonic generation in slow-light chalcogenide glass photonic crystal waveguides[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(15): 2818–2820.
- 21 M Spurny, L O'Faolain, D A Bulla, *et al.*. Fabrication of low loss dispersion engineered chalcogenide photonic crystals[J]. *Opt Express*, 2011, 19(3): 1991–1996.
- 22 K Suzuki, T Baba. Nonlinear light propagation in chalcogenide photonic crystal slow light waveguides[J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26675–26685.
- 23 K Suzuki, Y Hamachi, T Baba. Fabrication and characterization of chalcogenide glass photonic crystal waveguides[J]. *Opt Express*, 2009, 17(25): 22393–22400.
- 24 H Kurt, K Üstün, L Ayas. Study of different spectral regions and delay bandwidth relation in slow light photonic crystal waveguides [J]. *Opt Express*, 2010, 18(26): 26965–26977.
- 25 J Liang, L Y Ren, M J Yun, *et al.*. Wideband ultraflat slow light with large group index in a W1 photonic crystal waveguide[J]. *J Appl Phys*, 2011, 110(6): 063103.
- 26 L Dai, T Li, C Jiang. Wideband ultralow high-order-dispersion photonic crystal slow-light waveguide[J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(7): 1622–1626.
- 27 B Meng, L Wang, W Huang, *et al.*. Wideband and low dispersion slow-light waveguide based on a photonic crystal with crescent-

- shaped air holes[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(23): 5735–5742.
- 28 Cao Ying, Nie Qiuhua, Xu Tiefeng, *et al.*. Optical properties and structure of $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_6\text{S}_{(66-x)}\text{Se}_x$ glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(7): 1153–1157.
- 曹 莹, 聂秋华, 徐铁峰, 等. $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_6\text{S}_{(66-x)}\text{Se}_x$ 玻璃系统光学特性与结构[J]. *光子学报*, 2010, 39(7): 1153–1157.
- 29 Y Chen, X Shen, R Wang, *et al.*. Optical and structural properties of Ge–Sb–Se thin films fabricated by sputtering and thermal evaporation[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 548: 155–160.
- 30 A Säynätjoki, M Mulo, J Ahopelto, *et al.*. Dispersion engineering of photonic crystal waveguides with ring-shaped holes[J]. *Opt Express*, 2007, 15(13): 8323–8328.
- 31 J Li, T P White, L O'Faolain, *et al.*. Systematic design of flat band slow light in photonic crystal waveguides[J]. *Opt Express*, 2008, 16(9): 6227–6232.
- 32 L H Frandsen, A V Lavrinenko, J Fage-Pedersen, *et al.*. Photonic crystal waveguides with semi-slow light and tailored dispersion properties[J]. *Opt Express*, 2006, 14(20): 9444–9450.
- 33 R Hao, E Cassan, X Le Roux, *et al.*. Improvement of delay–bandwidth product in photonic crystal slow–light waveguides[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 16309–16319.

栏目编辑: 王晓琰