

引用本文:张龚业,蒋建,杨继杰. 基于二氧化硅覆盖的铌酸锂波导产生有效二次谐波的研究[J]. 光通信技术,2023,47(4):15-20.

基于二氧化硅覆盖的铌酸锂波导产生有效二次谐波的研究

张龚业,蒋建*,杨继杰

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院,南京 210023)

摘要:为了在波导中轻松实现相互作用波之间的相位匹配,产生有效的二次谐波,设计了一种新型条形波导——二氧化硅-铌酸锂-二氧化硅($\text{SiO}_2\text{-LiNbO}_3\text{-SiO}_2$),该条形波导由 SiO_2 和无蚀刻z切割的 LiNbO_3 组成,通过调整波导结构分析了波导的色散,研究了不同尺寸的 SiO_2 对基波与二次谐波相位匹配点的影响,分析了该条形波导倍频的可行性,并利用脉冲的振幅和宽度对频谱展宽的特性,实现超宽带连续谱。仿真结果表明:在覆盖层 SiO_2 宽度为1 600 nm、高度为400 nm的条形波导结构中,使用脉冲振幅为 10^7 a.u.,脉冲宽度为10 fs的超短脉冲,得到了一个带宽为1 302.5 nm的超宽带连续谱。

关键词:铌酸锂;相位匹配;二次谐波产生;超连续谱;光通信

中图分类号:TN929.1 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2023)04-0015-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on second harmonic generated by lithium niobate waveguide covered with silicon dioxide

ZHANG Gongye, JIANG Jian*, YANG Jijie

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,

School of Flexible Electronics(Future Technology), Nanjing 210023 China)

Abstract: In order to easily achieve phase matching between interacting waves in waveguide and generate effective second harmonics, a new type of strip waveguide silica-lithium niobate-silicon dioxide($\text{SiO}_2\text{-LiNbO}_3\text{-SiO}_2$) is designed. The strip waveguide is composed of SiO_2 and LiNbO_3 without etching z cutting. The dispersion of the waveguide is analyzed by adjusting the waveguide structure, and the influence of SiO_2 with different sizes on the phase matching points of the fundamental wave and the second harmonic is studied. The feasibility of frequency doubling of the strip waveguide is analyzed, and the ultra-wideband continuous spectrum is realized by using the characteristics of the amplitude and width of the pulse to broaden the spectrum. The simulation results show that an ultra-short pulse with a pulse amplitude of 10^7 a.u. and a pulse width of 10 fs is used to obtain an ultra-wideband continuous spectrum with a bandwidth of 1 302.5 nm in a strip waveguide structure with a covering layer SiO_2 width of 1 600 nm and a height of 400 nm.

Key words: lithium niobate, phase matching, second harmonic generation, supercontinuum spectrum, optical communication

0 引言

近年来,由于超连续谱具有频谱宽、方向性好和亮度较高等优点,已广泛地应用于光谱学、光通信、脉

冲压缩等^[1-2]领域。

传统使用光纤产生的超连续谱传输距离较长、泵浦能量较高,难以满足当前集成光学平台^[3-4]集成度高^[5-6]、尺寸小的要求。随着先进技术光学芯片持续不断地高速发展,通过对条形波导结构进行合理的设计,可以使其对光的限制能力变强并拥有远高于玻璃纤维的非线性系数,同时能够灵活控制色散,采用倍频技术获得超连续宽带频谱。目前,基于铌酸锂(LiNbO_3)、氮化硅、富氮氮化硅的超连续谱研究主要在集成光学平台上进行。在这几种材料中, LiNbO_3 ^[7]透明窗口很宽,在可见光波段、通信波段没有非线性

收稿日期:2023-01-03。

基金项目:国家自然科学基金项目(62175116,62075099)资助。

作者简介:张龚业(1997—),男,硕士研究生,现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院光学工程专业,主要研究方向为非线性光学,并针对铌酸锂条形波导的非线性频率变换进行研究和仿真验证。

*通信作者:蒋建(1976—),博士后,讲师,主要从事非线性光学、光纤光学等领域科研工作。



张龚业,蒋建,杨继杰. 基于二氧化硅覆盖的铌酸锂波导产生有效二次谐波的研究

吸收。由二氧化硅(SiO_2)制成的高折射率差波导可以很好地限制光在芯层,并且改善了波导的有效非线性效应,无需用较高的能量使其非线性效应变强^[8-9]。在通信波段中, LiNbO_3 超连续谱的应用前景十分广阔^[10]。因此,为了在波导中产生有效的二次谐波,本文设计一种新型条形波导— $\text{SiO}_2\text{-LiNbO}_3\text{-SiO}_2$ 。

1 新型条形波导设计原理

光线从一种介质射入另一种介质时的反射规律可以用折射定律和反射定律来描述。光波导全反射可以表示为

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

其中, θ_c 是入射角的临界角, n_1 和 n_2 分别是2种介质的折射率。当入射角大于临界角时,光线将会被完全反射回原来的介质中,而不会透射到新的介质中。在光波导中,当光线从高折射率的介质射入低折射率的介质时,如果入射角大于临界角,光线会受到全反射现象的影响,从而在光波导中持续传播。因此,全反射公式在光波导器件的设计和应用中具有重要的意义。

光波导分为平板波导和条形波导。由于平板波导只能在垂直方向对光进行约束,无法在水平方向进行约束,因此仅可以作为分析波导非线性光学的简单模型;而条形波导不仅可以同时在水平、垂直方向对光进行约束,还能够在较小的横截面中实现对光场的较强约束,提高了非线性系数,更适合于研制高效的非线性波导的器件。

LiNbO_3 具有优良的电光和非线性光学性能; SiO_2 具有高透过率和易于加工制备的特点,但不具有电光和二阶非线性光学效应,这限制了其在集成光学方面的应用。为了充分发挥 SiO_2 和 LiNbO_3 的优势,本文将两者集成在一起设计出 $\text{SiO}_2\text{-LiNbO}_3\text{-SiO}_2$,该波导中间的介质层为 LiNbO_3 ,两侧包层为 SiO_2 , LiNbO_3 波导层的折射率大于两侧包层的折射率 SiO_2 ,这样光就能够集中在波导层中传播,从而起到限制光外溢的作用;同时,通过在 SiO_2 波导表面沉积 LiNbO_3 薄膜,使 SiO_2 的平面光波导具有电光和非线性光学特性。

在光波导中,由于模式的有效折射率通常会随着波长的增大而逐渐减小,且与波导的宽度和高度联系密切。因此,通过合理设计波导尺寸便能在这些波导结构下使基频光与倍频光的有效折射率相等,从而实现完美的相位匹配关系。在非线性光学材料里,基频光和倍频光对应的折射率分别为 n_ω 和 $n_{2\omega}$,相对应的

波矢可以用 k_ω 和 $k_{2\omega}$ 表示。当 $\Delta k = k_{2\omega} - k_\omega = 0$ 时,满足相位匹配条件,同时满足了能量守恒条件 $\omega + \omega = 2\omega$ 和动量守恒条件 $k_\omega + k_\omega = k_{2\omega}$ 。其中, $k_\omega = (\omega/c) \cdot n_\omega$, $k_{2\omega} = (\omega/c) \cdot n_{2\omega}$,可得: $k_{2\omega} = (2\omega/c) \cdot n_{2\omega}$, c 表示光速。所以,要想在介质中实现相位匹配,就要使基波与二次谐波的折射率相同,或者传播速度相等。

因此,依据以上理论原理,本文使用MODE Solutions软件建立 $\text{SiO}_2\text{-LiNbO}_3\text{-SiO}_2$ 模型,并使用有限差分本征模式方法计算模式的有效折射率,使基频光与倍频光的有效折射率相等,从而得到满足色散要求的相位匹配的泵浦波长。

2 仿真分析

LiNbO_3 二次谐波的横磁模(TM)的产生条件是需要严格满足相互作用波之间的相位匹配关系。在光波导中,不同模式相互作用光的折射率也不同,需要通过计算模式有效折射率来满足相互作用波之间的相位匹配。此外,设计的波导宽度、波导厚度,均与模式的有效折射率相关,可以通过合理设计波导的尺寸,进而在这些波导结构下实现基频光与倍频光的相位匹配,从而在波导中产生有效的基波,即横电模(TE)。本文从波导色散、波导结构、倍频、脉冲振幅和宽度等方面验证所提 $\text{SiO}_2\text{-LiNbO}_3\text{-SiO}_2$ 的性能。

2.1 波导色散分析

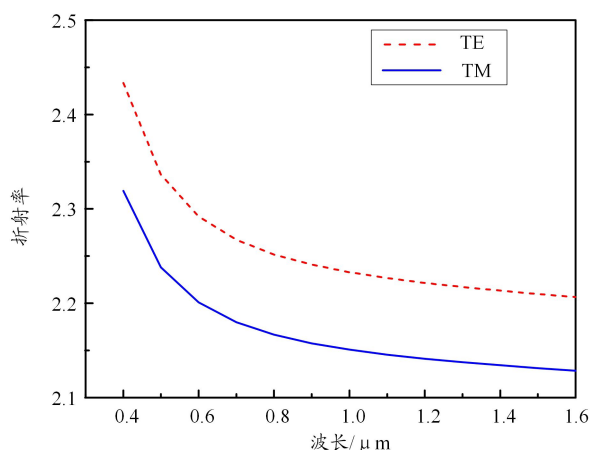
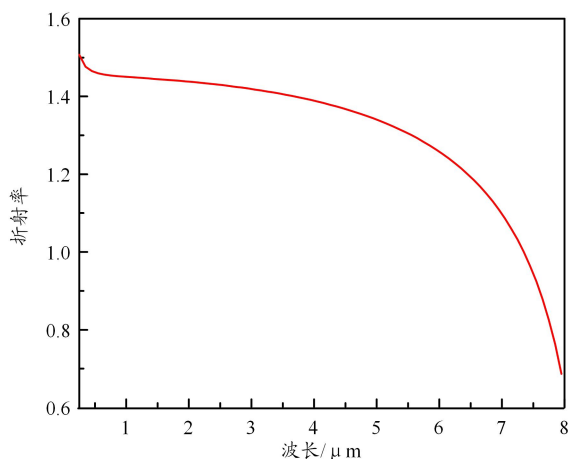
色散是指不同频率的光在介质中传播时折射率的变化。不同频率的光在介质中传播时,其折射率会有所不同,导致了色散现象的产生。波导中的总色散主要包括材料色散和波导色散,材料的色散由材料和波长决定,通常用Sellmeier方程来表示。 LiNbO_3 的折射率 $n_L^{(11)}$ 可表示为

$$n_L^2 - 1 = \frac{2.9804\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02047} + \frac{0.5981\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0666} + \frac{8.9543\lambda^2}{\lambda^2 - 416.8} \quad (2)$$

其中, λ 为TE波长。本文所提的 $\text{SiO}_2\text{-LiNbO}_3\text{-SiO}_2$ 以 LiNbO_3 为芯层,包层材料是添加的 SiO_2 。在研究色散时,也需计算其材料的折射率。 SiO_2 折射率^[12-13] $n_S^{(2)}$ 可表示为

$$n_S^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161} \quad (3)$$

LiNbO_3 和 SiO_2 折射率的仿真结果如图1和图2

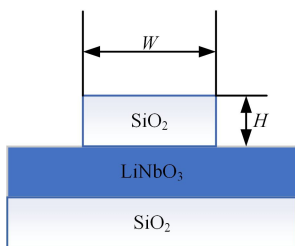
图1 LiNbO₃的折射率仿真结果图2 SiO₂的折射率仿真结果

所示。图1中,TE、TM这2种模式的光的折射率均随波长的增大而减小。图2中, SiO₂的折射率随入射波长变化而变化,也随着波长的增大而减小。因此, SiO₂为正常色散材料。

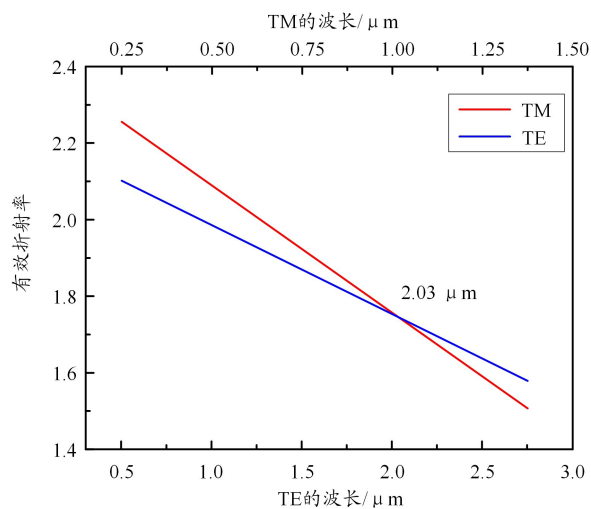
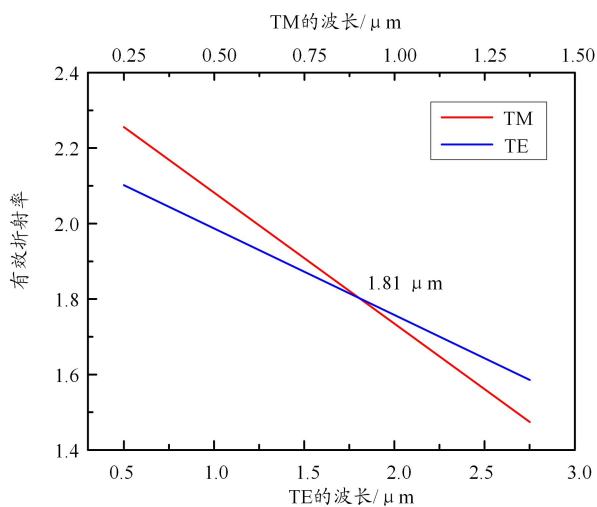
材料色散一般为固定值,不会随着波导结构发生变化。与材料色散相比,波导色散一般较小,可以通过改变波导结构来调控色散。

2.2 改变波导结构对色散调控的影响分析

本文应用 MODE 仿真软件分析波导,计算其模式有效折射率,从而得到相位匹配的泵浦波长。SiO₂-LiNbO₃-SiO₂结构示意图如图3所示。图中底层衬底部分和白色覆盖层均为 SiO₂, H 、 W 分别为 SiO₂的高度和宽度。蓝色芯层部分选用的是 z 切 LiNbO₃。在此结构中,设置温度为 25℃,芯层 LiNbO₃波导结构不变,固定

图3 SiO₂-LiNbO₃-SiO₂结构图

覆盖层 SiO₂宽度 $W=1\ 200\ \text{nm}$,通过改变其高度 H 仿真不同覆盖层高度下 TE 与 TM 的相位匹配点。本文计算了波长在 $0.5\sim 2.7\ \mu\text{m}$ 通信波段和它的倍频光在 $0.25\sim 1.35\ \mu\text{m}$ 的相位匹配点。不同覆盖层高度 ($H=150, 200, 300, 400, 450\ \text{nm}$) 下, TE 与 TM 的相位匹配点(两线的交点)变化情况如图4所示。可以看出,当覆盖层宽度保持不变,在高度由 $150\ \text{nm}$ 增加到 $450\ \text{nm}$ 的过程中,相位匹配点的变化情况依次为 $2.03, 1.81, 1.88, 1.58, 1.71\ \mu\text{m}$ 。由此可知,当覆盖层宽度保持不变时,相位匹配点随着覆盖层高度的变化波动较大,呈现为来回上升趋势,这主要是由于波导色散对高度的变化比较敏感;若略微改变一点高度,则相位匹配点变化非常大,不利于制备光器件。为此,本文在高度不变的情况下,研究 SiO₂-LiNbO₃-SiO₂ 宽度变化的敏感程度。同样地,保持底层 SiO₂、芯层 LiNbO₃ 波导

(a) $H=150\ \text{nm}$ (b) $H=200\ \text{nm}$

张龚业,蒋建,杨继杰. 基于二氧化硅覆盖的铌酸锂波导产生有效二次谐波的研究

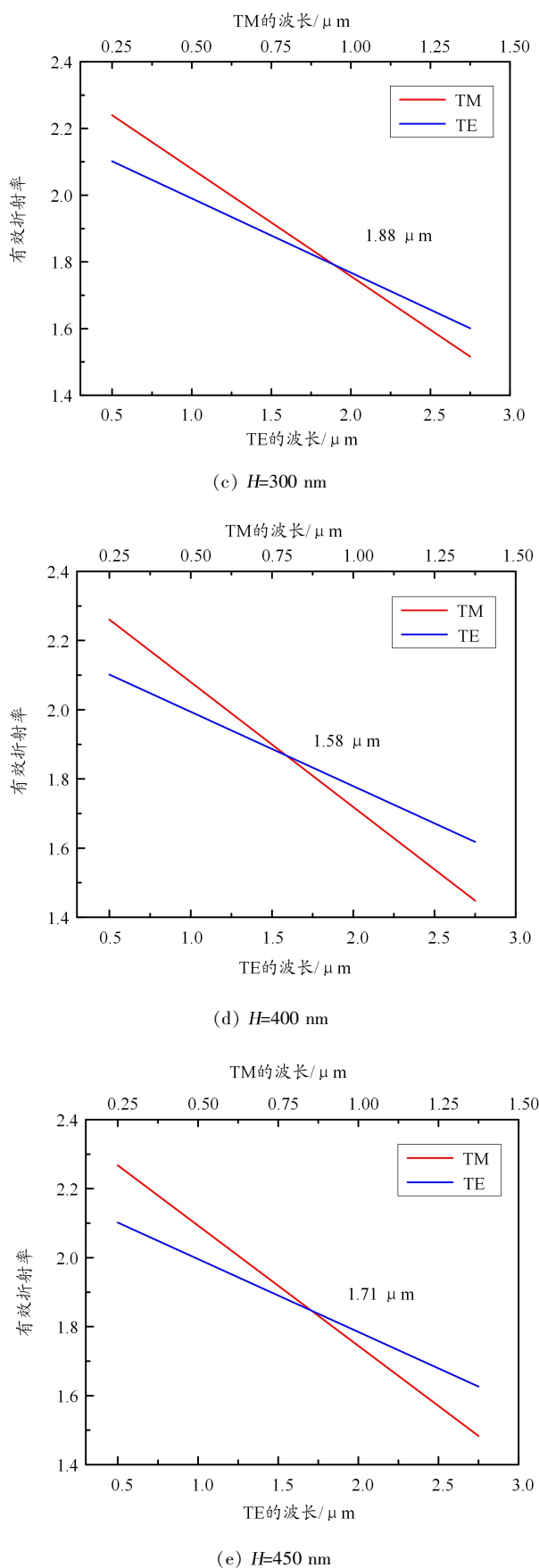


图4 不同覆盖层高度下,TE与TM的相位匹配点

结构不变,固定覆盖层 SiO_2 高度 $H=400\text{ nm}$,通过改变覆盖层 SiO_2 宽度 W ,仿真不同覆盖层 SiO_2 宽度下 TE 与 TM 的相位匹配点,得到 TE 与 TM 相位匹配点的变化情况如图 5 所示。可以看出,TE 与 TM 的相位匹配点随覆盖层 SiO_2 宽度的增大先增大后不变,且当覆盖层 SiO_2 宽度 W 为 $2\ 000\text{ nm}$ 后,再无相位匹配点。本文选用覆盖层 SiO_2 宽度 $W=1\ 600\text{ nm}$ 、高度 $H=400\text{ nm}$ 的波导结构,宽度变化的余地很大,各有 300 nm 的选择空间,不会因为细微的变化导致相位匹配点发生敏感变化和难以控制,大大降低了实际光器件制备的难度。

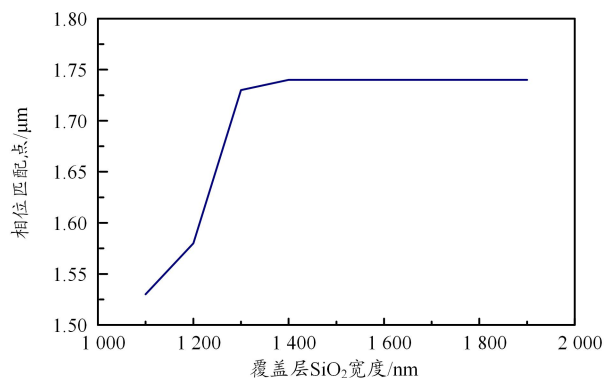


图5 不同覆盖层宽度下,TE与TM的相位匹配点变化情况

2.3 倍频的可行性分析

为验证 $\text{SiO}_2\text{-LiNbO}_3\text{-SiO}_2$ 倍频的可行性,本文采用仿真软件 FDTD Solutions 设计波导 3D 结构,参数为:宽度 $W=1\ 600\text{ nm}$ 、高度 $H=400\text{ nm}$,波导水平长度为 $25\ \mu\text{m}$,光源波长为 $1\ 740\text{ nm}$,模式为 TE,倍频光为 870 nm 。首先,仿真 TE 在覆盖层 SiO_2 宽度为 $1\ 600\text{ nm}$ 、高度为 400 nm 的波导中的分布情况,如图 6 所示。可以看出,该条形波导对模式限制能力很强,几乎所有的能量都在波导内部。

然后,对长为 $25\ \mu\text{m}$ 的条形波导进行非线性仿真。由于材料色散和波导模式色散的存在,因此波长

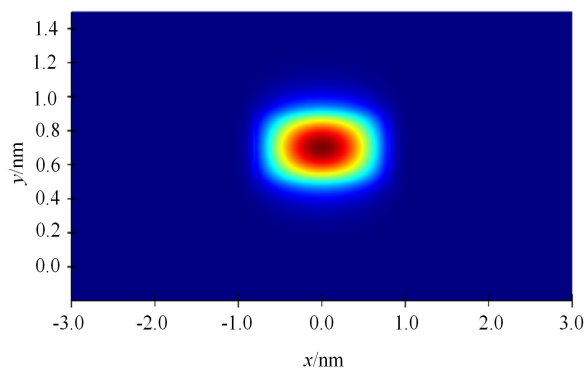
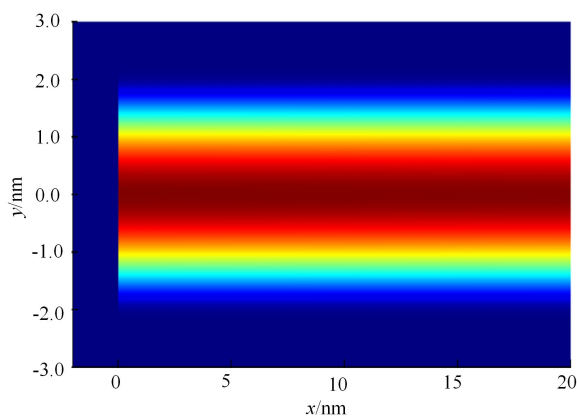
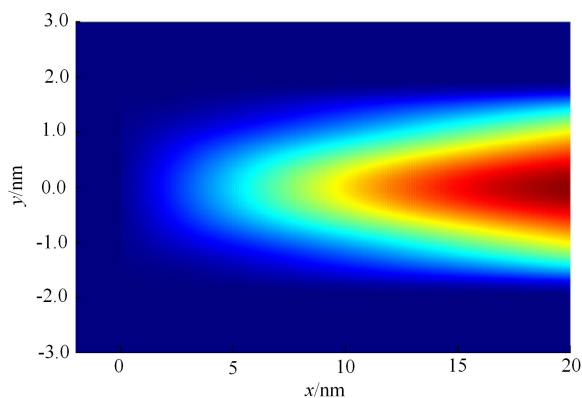


图6 TE 模式分布情况

为 1 740 nm 的 TE 光强在发生倍频时, 相位是失配的; 而波长为 870 nm 的 TM 光强在波导中呈现周期性振荡的特点, 1 740 nm 的 TE 光强基本保持不变。本文仿真波长为 1 740、870 nm 波导模式的电场强度分布分别如图 7 所示。可以看出, 波长为 870 nm 的 TM 光强在波导里一直持续不断地增强, 同时在长距离转换时 1 740 nm 的 TE 光强也开始有所衰减。最后, 沿着波导中心提取出电场强度, 并绘制各自波长电场强度随着传播距离演化的关系, 如图 8 所示。可以看出, 波长为 870 nm 的 TE 光强振幅随着传播距离增大而增大, 因此波长为 1 740 nm 的 TE 光强可以持续不断地转移到波长为 870 nm 的 TM。



(a) 1 740 nm 的 TE



(b) 870 nm 的 TM

图 7 相位匹配时光学倍频仿真

2.4 脉冲的振幅和宽度对超连续谱的影响分析

本文在时域有限差分(FDTD)软件中, 设计具体的光源脉冲参数、合理的仿真区域、精确的网格剖分和各类监视器位置, 通过观察时间监视器的监视结果, 得到宽带的连续光谱图。光谱展宽与脉冲振幅 m 的变化关系如图 9 所示。可以看出, 当入射的脉冲振幅 $m \leq$

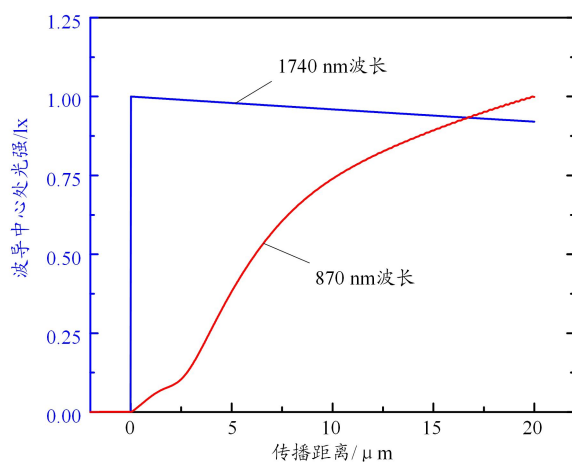
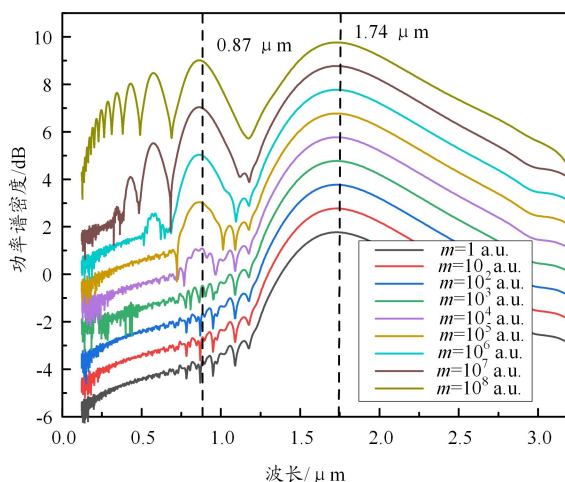


图 8 波导中心处光强随传播距离演化示意图

图 9 不同脉冲振幅 m 下的输出超连续谱

10^3 a.u. 时, 在泵浦源中心位置脉冲产生的频谱变宽是对称的; 当脉冲振幅逐渐增加到 10^4 a.u. 时, 长波长的色散波慢慢地显现, 处于 $0.87 \mu\text{m}$ 处的 TM 第一次出现了微弱的谐波, 并且在脉冲振幅缓缓增加的过程中, 出现了较短波长的色散波; 继续增大脉冲振幅, 光谱变成了非对称的频谱展宽, 首先出现长波长的色散波, TM 紧跟其后, 然后是短波长的色散波, 最后再次显现的是其余的高阶谐波。

固定脉冲振幅为 10^7 a.u., 改变脉冲的宽度 b , 产生的光谱图如图 10 所示。可以看出, 当脉冲宽度 b 从 50 fs 减小到 20 fs 时, TE、TM、高阶谐波的带宽均随着脉冲宽度 b 的减小而增大, 以致各个光谱在中心波长附近发生展宽, 从而形成一个超宽带的连续谱。

综合分析脉冲的振幅和宽度对超连续谱产生的影响可知, 当脉冲振幅 m 为 10^7 a.u.、脉冲宽度 b 为 10 fs 时, 选择最高次谐波的中心波长与泵浦中心波长之间

张龚业, 蒋建, 杨继杰. 基于二氧化硅覆盖的铌酸锂波导产生有效二次谐波的研究

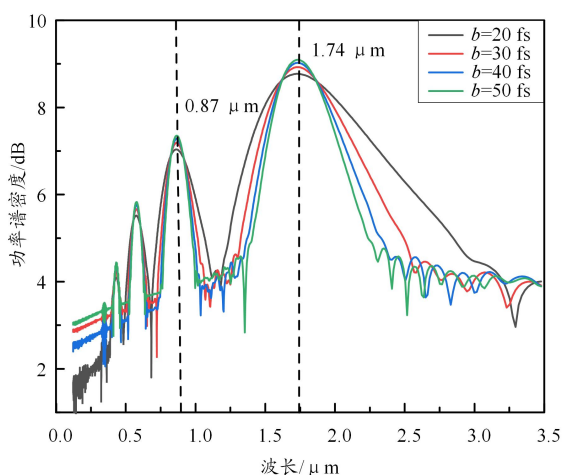


图 10 不同脉冲宽度 b 下的输出超连续谱

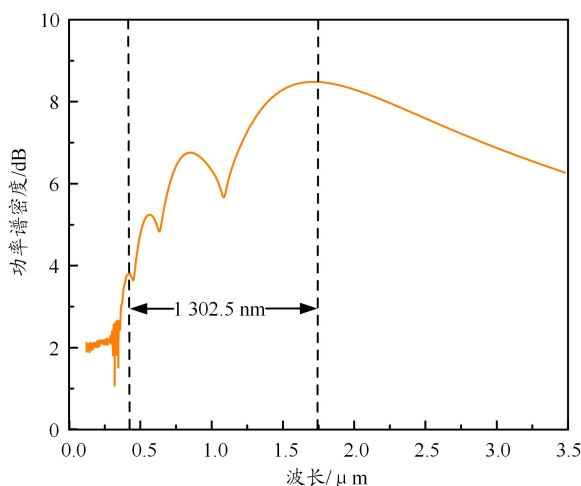


图 11 超连续谱的产生

的距离,产生的光谱图如图 11 所示。可以看出,此条形波导能够产生一个带宽大于 1 302.5 nm 的超连续谱。

3 结束语

本文设计了一种新的无蚀刻 LiNbO_3 条形波导,通过 SiO_2 和无蚀刻 z 切割的 LiNbO_3 来解决宽带 TM 超连续谱产生的问题,且通过调整波导结构分析了波导的色散,研究了不同尺寸的 SiO_2 对 TE 与 TM 相位匹配点的影响,得到满足色散要求的波导结构,降低了制备实际光器件的难度;利用脉冲振幅与脉冲宽度对频谱展宽的特性,得到了能够覆盖可见光-通信-近红外波段的超宽带连续谱,对全光通信的发展有着重要的意义^[14-17]。

参考文献:

- [1] ZHANG X. Study of supercontinuum and high repetition rate short pulse generation[D]. Storrs: University of Connecticut, 2018, 5-32.
- [2] ZHOU K, LI Q, KANG Z, et al. On-chip octave-spanning supercontinuum generation in hybrid slot waveguide by power-efficient dual pump[J]. Results in Physics, 2021, 24: 104195-104204.
- [3] DESIATOV B, LONČAR M. Silicon photodetector for integrated lithium niobate photonics[J]. Applied Physics Letters, 2019, 115(12): 121108-121114.
- [4] GAO B, REN M, WU W, et al. Lithium niobate metasurfaces [J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(5): 1800312-1800317.
- [5] FANG B, LI H, ZHU S, et al. Second-harmonic generation and manipulation in lithium niobate slab waveguides by grating metasurfaces [J]. Photonics Research, 2020, 8(8): 1296-1300.
- [6] JANKOWSKI M, LANGROCK C, DESIATOV B, et al. Ultrabroadband nonlinear optics in nanophotonic periodically poled lithium niobate waveguides[J]. Optica, 2020, 7(1): 40-46.
- [7] FANG B, GAO S, WANG Z, et al. Efficient second harmonic generation in silicon covered lithium niobate waveguides [J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(6): 060004-060009.
- [8] POBERAJ G, HU H, SOHLER W, et al. Lithium niobate on insulator (LNOI) for micro - photonic devices[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(4): 488-503.
- [9] BOES A, CORCORAN B, CHANG L, et al. Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits [J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(4): 1700256-1700298.
- [10] 喻千尘, 梁雪瑞, 马卫东. 铌酸锂电光调制器的研究进展[J]. 光通信技术, 2020, 44(4): 37-39.
- [11] ZELMON D E, SMALL D L, JUNDT D. Infrared corrected Sellmeier coefficients for congruently grown lithium niobate and 5 mol.% magnesium oxide -doped lithium niobate [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1997, 14(12): 3319-3322.
- [12] MALITSON I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica [J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55: 1205-1208.
- [13] TAN C Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1998, 223: 158-163.
- [14] HONARDOOST A, ABDELSALAM K, FATHPOUR S. Rejuvenating a versatile photonic material: thin - film lithium niobate [J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(9): 2000088-2000108.
- [15] CASTELLÓ-LURBE D, VERMEULEN N, SILVESTRE E. Towards an analytical framework for tailoring supercontinuum generation[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26629-26645.
- [16] RAO A. Thin-film lithium niobate photonics for electro-optics, nonlinear optics, and quantum optics on silicon[D]. Florida: University of Central Florida, 2018.