

引用格式: LI Junhui, YAO Hao, DENG Jiayao, et al. Electro-optic Tunable Grating-assisted Optical Waveguide Directional Coupler in Lithium Niobate on Insulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052417

李俊慧,姚昊,邓佳瑶,等. 基于铌酸锂薄膜波导的电光调谐光栅辅助定向耦合器研究[J]. 光子学报, 2023, 52(10):1052417

基于铌酸锂薄膜波导的电光调谐光栅辅助定向耦合器研究

李俊慧,姚昊,邓佳瑶,陈开鑫

(电子科技大学 光电科学与工程学院,成都 611731)

摘要:提出并实验研究了一种基于铌酸锂薄膜光波导的电光调谐的光栅辅助定向耦合器。该耦合器由单模与双模脊形波导及制作于双模波导侧壁的长周期光栅构成。长周期光栅的引入补偿了单模与双模波导中基模的相位失配,可在共振波长实现两波导中基模的高效耦合。进一步地,在双模脊形波导两侧制作调谐电极实现了高速、低驱动电压的电光调谐功能。优化了器件的制作工艺,并采用单次干法刻蚀将耦合器的光栅与波导同步制作于 X 切铌酸锂薄膜上。测试结果表明所制作的器件在 1 595.3 nm 波长处实现了 14.8 dB 的隔离度,其电光调谐效率为 0.38 nm/V(1 595.3 nm~1 599.0 nm),热光调谐效率为 0.14 nm/°C(25 °C~50 °C)。该器件可用于实现可调谐滤波、滤模、电光调制及高灵敏度温度传感等功能。

关键词:光栅辅助的定向耦合器;长周期波导光栅;铌酸锂薄膜;电光调谐;热光调谐

中图分类号:TN256

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235210.1052417

0 引言

光栅辅助定向耦合器(Grating-assisted Directional Coupler, GADC)是一种重要的光波导器件,该器件通过引入光栅结构补偿两波导中模式间失配的相位,使得不能耦合的两波导模式实现基于相位匹配的高效耦合^[1-2]。按照所采用的光栅类型以及耦合光波的传播方向,GADC 可分为布拉格光栅辅助的反向耦合器^[3-13]和长周期光栅(Long Period Gratings, LPG)辅助的同向耦合器^[14-20]。由于 GADC 不但具有结构紧凑、易集成、功能众多,波长选择性好等优点,而且可将光栅与定向耦合器的优异特性集于一身,实现单独光栅或定向耦合器难以实现的功能。因此自 1985 年 SYMS R R A 提出这一器件以来便受到了广泛关注^[1]。经过多年的研究,利用 GADC 已实现包括反向光耦合器^[3,4],光上下路滤波器^[5-8,15],光延迟线^[10],波分复用器^[11,12,16],模分复用器^[13,20],滤波器^[14,17,18],滤模器^[19]等一系列光波导器件。

可调谐性是提升器件性能,实现器件重构特性,以及弥补器件制作工艺误差、降低制作工艺要求的关键所在。可调谐性的实现通常依赖于电光效应与热光效应,这其中基于电光效应的电光调谐具有高速、低功耗的特点。电光调谐的波导光栅已经基于电光聚合物^[21],绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)^[22],铌酸锂^[23],及混合玻璃波导/液晶^[24]等材料平台实现,但受限于材料与器件结构两方面,上述器件的调谐效率通常低于 100 pm/V。此外,电光调谐的 GADC 也已经利用半导体材料 InGaAsP/InP 实现^[17],但 InP 较小的电光系数导致其调谐效率较低。尽管我们利用铌酸锂制作的 GADC 在采用推挽式电极时实现了 1.195 nm/V 的调谐效率^[25],但是所采用的质子交换铌酸锂波导具有较小的折射率差,因此器件具有较大的尺寸,不利于集成和小型化应用。而铌酸锂薄膜作为一种优异的新材料,不但保持了铌酸锂较大的电光效应,而且能实

基金项目:国家自然科学基金(No. 62075027),国家重点研究发展计划(No. 2021YFB2800104),深圳市关键技术研发计划(No. JSGG20210802154413040)

第一作者:李俊慧,201811050716@std.uestc.edu.cn

通讯作者:陈开鑫,chenkx@uestc.edu.cn

收稿日期:2023-07-16;录用日期:2023-08-18

<http://www.photon.ac.cn>

现高折射率差光波导,十分有利于发展紧凑的电光调谐的光波导器件,近年来广受关注^[26-27]。基于铌酸锂薄膜的高速调制器^[28-29]、高Q值微环振荡器^[30]、布拉格光栅滤波器^[31]、光交错滤波器^[32]、模式复用(解复用)器^[33]等已相继报道。

本文提出一种基于铌酸锂薄膜光波导的电光调谐GADC,通过在铌酸锂薄膜非对称定向耦合器的双模脊形波导侧臂制作长周期波导光栅(Long Period Waveguide Gratings, LPWG)来实现该耦合器的双模波导(Two Mode Waveguide, TMW)中基模 E_{11T}^s 与单模波导(Single Mode Waveguide, SMW)中基模 E_{11S}^s 的耦合(这里上标 z 代表光波电场最大值的振动方向,由于 z 方向即是水平方向,因此也对应到准TE模式)。进一步地,在TMW两侧制作调谐电极,实现了高速、低驱动电压的电光调谐功能。我们研究优化了器件的制作工艺,并采用单次干法刻蚀将耦合器的光栅与波导同步制作于 x 切铌酸锂薄膜上。由于采用了高折射率差的薄膜铌酸锂材料平台,我们制作的光栅长度仅为 $816\ \mu\text{m}$ 。测试表明,所制作的电光调谐的GADC实现了 $14.8\ \text{dB}$ 的阻带隔离度, $0.38\ \text{nm/V}$ 的电光调谐效率和 $0.14\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 热光调谐效率。我们制作的GADC可用于实现高速调谐的滤波、滤模、电光调制及高灵敏度温度传感等功能。

1 器件结构与设计

本文设计的铌酸锂薄膜GADC的结构如图1(a)所示,它由一个非对称定向耦合器、一个侧壁LPWG和一组电极构成。非对称定向耦合器由间距为 S 的一个SMW和一个TMW构成,SMW宽度为 w_s ,TMW宽度为 w_T 。LPWG制作于TMW内侧,周期为 Λ ,光栅深度为 d ,周期数为 N 。为利用铌酸锂最大的电光系数 γ_{33} ,器件采用 $600\ \text{nm}$ 厚 x 切铌酸锂薄膜制作,光波沿 y 方向传输。为简化制作工艺,所有脊形波导的刻蚀深度均为 h_c 。此外,为了避免金属电极对光的吸收,在波导与电极之间制作有一层二氧化硅(SiO_2)缓冲层,如图1(b)所示。显然,如果SMW与TMW的宽度有较大差异,两波导中的基模 E_{11S}^s 与 E_{11T}^s 的传播常数也会相差较大,因此这两个基模不会相互耦合,但是LPG的引入可以补偿两基模的传播常数的差异,从而实现两个模式高效的基于相位匹配的耦合。

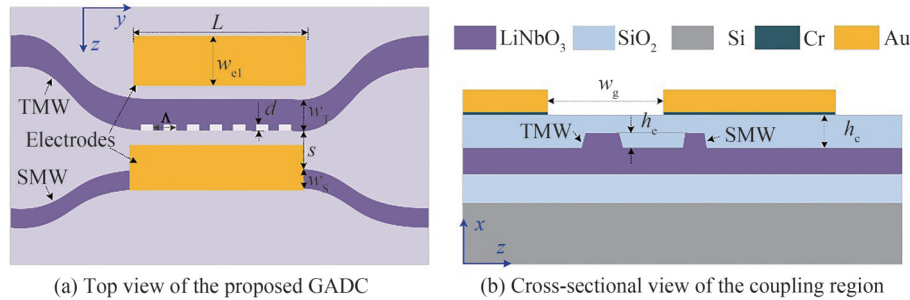


图1 本文提出的铌酸锂薄膜GADC器件结构
Fig.1 Schematic diagram of the proposed GADC structure

假设缓冲层与上包层的二氧化硅具有相同的折射率 n_2 ,芯层铌酸锂薄膜折射率为 n_1 。在工作波长为 $1550\ \text{nm}$ 时,对于TE偏振, $n_{1TE}=2.1381$,对于TM偏振, $n_{1TM}=2.2113$,且对两种偏振有 $n_{2TE}=n_{2TM}=1.4446$ 。由于铌酸锂较大的双折射,所设计的LPWG不能同时对TE与TM偏振光均实现较好的相位匹配。因此,所设计的光栅参数仅满足 E_{11S}^s 和 E_{11T}^s 的相位匹配,用于实现 E_{11S}^s 和 E_{11T}^s 模式的耦合。

为了设计该GADC,首先需要确定SMW与TMW的宽度并得到两波导中基模 E_{11S}^s 和 E_{11T}^s 的有效折射率。这里采用商用有限元解模软件COMSOL对三种不同刻蚀深度的脊形波导的色散特性进行分析,其结果如图2所示。可以看出,当 h_c 选为 $200\ \text{nm}$ 时,SMW宽度范围为 $1.0\sim 1.4\ \mu\text{m}$,满足 E_{11S}^s 单模传输条件, TMW宽度范围为 $1.4\sim 2.6\ \mu\text{m}$,满足 E_{11T}^s 和 E_{21T}^s 模式双模传输条件。考虑到工艺条件,SMW的宽度 w_s 设定为 $1.2\ \mu\text{m}$ 。TMW的宽度 w_T 取为 $2.0\ \mu\text{m}$ 。侧壁光栅的一个优点是可与波导结构同步制作,但考虑到实验室条件,光栅深度 d 不宜太小,进一步地考虑到太大的 d 会导致较大的光传输损耗,因此在平衡损耗与光栅制作情况后,我们将 d 选定为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。

根据确定的波导宽度计算得到两波导中基模 E_{11S}^s 和 E_{11T}^s 的有效折射率 N_{11S} 与 N_{11T} 分别为 1.9090 和

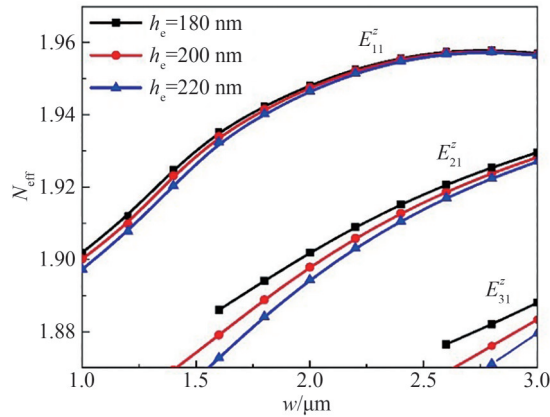


图2 不同刻蚀深度 h_e ($=150\text{ nm}, 170\text{ nm}, 200\text{ nm}$) 下, 准 TE 模式在 1550 nm 波长的色散曲线

Fig.2 Dispersion of the q-TE modes calculated as functions of the waveguide width w at 1550 nm wavelength for different etching depths of h_e ($=150\text{ nm}, 170\text{ nm}, 200\text{ nm}$)

1.9429, 利用式(1)^[34]

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{N_{11T} - N_{11S}} \quad (1)$$

计算得到在中心波长为 1550 nm 时光栅的周期 $\Lambda = 45.7\ \mu\text{m}$ 。

在确定光栅周期后采用光栅分析软件(GratingMOD, Rsoft)计算 GADC 的 TMW 的传输谱, 从而得到光栅长度。图 3 给出了在光栅占空比为 50%, 两波导间距 $S = 0.7\ \mu\text{m}$, 光栅深度 $d = 0.2\ \mu\text{m}$ 时, $N = 0, 13$ 与 17 的 TMW 传输谱, 这里 $N = 0$ 代表没有光栅。可以看出没有光栅时的非对称定向耦合器完全没有耦合发生, 而 $N = 17$ 时则在 1550 nm 波长处实现了阻带隔离度大于 30 dB 的传输, 对应的光栅长度为 $777\ \mu\text{m}$ 。以上结果初步说明 TMW 中的 E_{11T}^z 模式可以借助侧壁 LPWG 高效耦合成为 SMW 中的 E_{11S}^z 模式。为了进一步证明以上结论, 采用三维光束传播软件(3DFD-BPM)(BeamPROP, RSoft)模拟分析了在 1550 nm 波长时所设计的 GADC 的光传输特性, 其结果如图 4 所示。图 4(a) 为 E_{11T}^z 模耦合进入 TMW 输入端后的传输情况, 可以看出 TMW 波导中的 E_{11T}^z 模场可以高效地耦合成为 SMW 中的 E_{11S}^z 模。类似地, 从图 4(b) 可以看出, 在输入端耦合进入 SMW 中的 E_{11S}^z 模同样可以高效地耦合成为 TMW 波导中的 E_{11T}^z 模。此外, 从图 4(a) 与 (b) 可见, 光波在 GADC 中的耦合传输不是单调光滑的曲线, 光栅的存在导致能量在 TMW (或 SMW) 中呈现周期性震荡并逐步耦合进入 SMW (或 TMW) 中, 这有别于传统的对称定向耦合器或非对称定向耦合器的传输谱。图 4(c) 为 E_{21T}^z 模耦合进入 TMW 时的传输特性。可以看出 E_{21T}^z 模大部分束缚在 TMW 内传输, 少部分模场沿着光栅向外辐射, 在倏逝场的作用下 SMW 内会出现一些场分布, 但光能量随着传播逐渐损耗。从能量传输谱看, TMW 内的光场能量沿着传播方向发生周期性小幅度震荡, 大部分光场能量限制在 TMW 中,

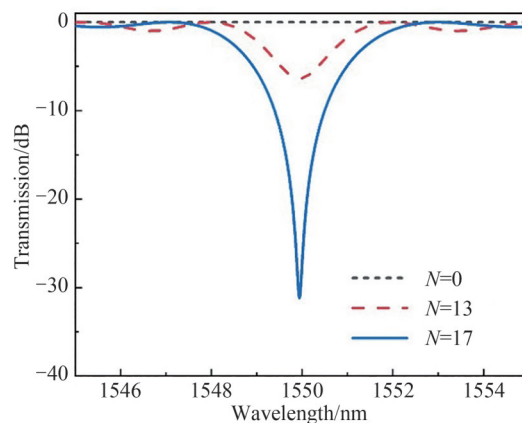


图3 LPWG取不同周期数 N 时, E_{11T}^z 模式在 GADC 的 TMW 中的传输谱

Fig.3 Transmission spectra of the TMW of the GADC for the E_{11T}^z mode at different period number N of the LPWG

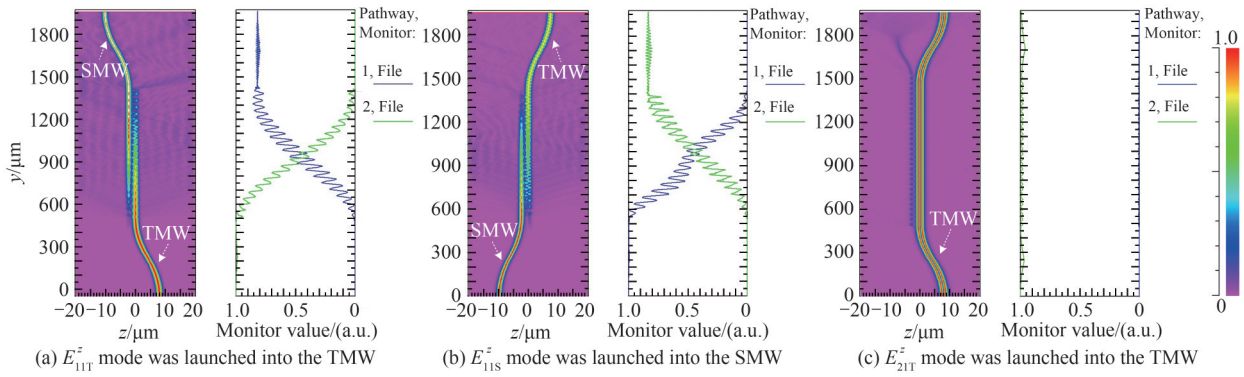


图4 仿真计算的所设计的GADC在1550 nm波长的传输

Fig.4 Simulated propagation dynamics of the designed GADC at 1550 nm wavelength

SMW中也存在小幅度周期性震荡衰减的光场能量,但最终衰减为零,即TMW中的 E_{21T}^z 模不会与SMW的 E_{11S}^z 模发生耦合而引发模式串扰。

基于以上仿真参数,对于特定的波长,在侧壁LPWG的作用下非对称定向耦合器两个波导臂中的基模能够发生完全耦合,而两波导内其余模式之间不发生耦合,利用该特点可以实现滤波或滤模功能。本文采用集总式调谐电极,根据如图1所示的波导结构及上述波导参数,两电极宽度 w_{e1} 均设定为200 μm ,电极间距 w_g 设定为5.0 μm ,电极长度为1 mm。

2 器件的制备

本文提出的GADC采用济南晶正电子科技有限公司生产的600 nm厚 x 切铌酸锂薄膜制作,波导沿 y 方向布置。首先采用标准的光刻与化学腐蚀工艺将设计的GADC图案转移到铬膜上,然后通过质子交换和感应耦合等离子体刻蚀(Inductively Coupled Plasma, ICP)制作得到薄膜铌酸锂脊形波导。采用台阶仪(XP-2)测试得到刻蚀的脊深为205 nm。为了提高耦合效率,波导输入/输出端设计制作了渐变波导结构,两端宽度缓慢扩大到4 μm ;完成波导制作后,利用电子束蒸发及电镀工艺并通过精确对版光刻制作了厚度约为1 μm 、长度为1 mm的钛金电极。为了降低金属电极对光的吸收损耗,制作电极前,首先利用PECVD在波导表面生长了一层约为300 nm厚的 SiO_2 作为缓冲层。所制作的芯片在两端进行切割、研磨、抛光后,经测试其长度大约为10 mm。需要指出的是,为了方便制作与测试,我们实际制作的器件远大于设计的GADC的长度,增加的长度主要是器件的输入输出端。最后考虑到LPWG的谐振波长对光栅周期非常敏感,同时也考虑到分析及制作工艺均存在误差,我们在同一铌酸锂基底上设计、制作了一系列不同周期,但周期数均为17的GADC。所制作的芯片样品如图5(a)所示,图5(b)是所制作的LPWG的显微照片,图5(c)是所制作的调谐电极的显微照片。

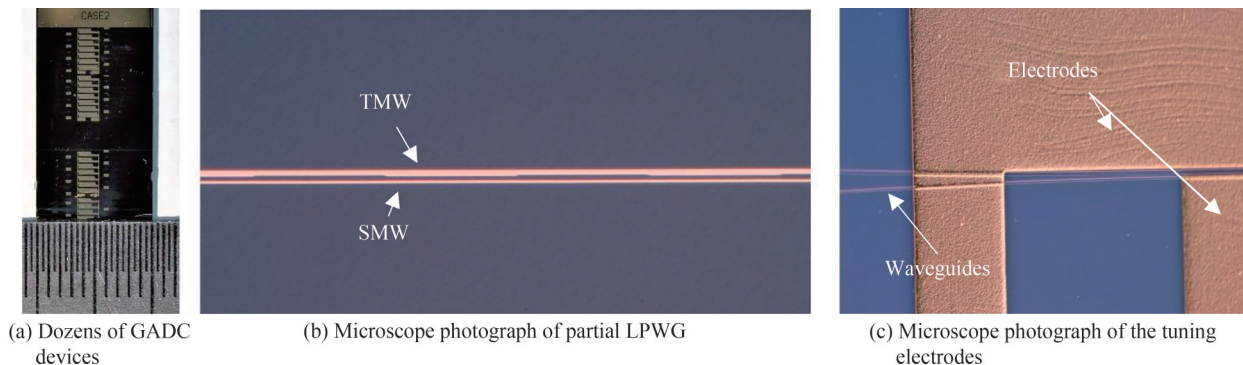


图5 制作的GADC器件的实物

Fig.5 Photograph of the fabricated GADC chip

3 器件测试分析

首先测量所制作的 GADC 的光传输特性,测试在室温 25 °C 条件下进行。来自于放大的自发辐射 (Amplified spontaneous emission, ASE) 光源 (B&A Technology AS4600) 的宽带光信号经过偏振控制器调整到 TE 偏振后,由模场直径为 3.2 μm 的高数值孔径光纤 (Nufern UHNA7) 分别耦合进入待测 GADC 的 TMW 与 SMW 中,分别激发 E_{11T}^s 与 E_{11S}^s 模式。在输出端,来自于 TMW 与 SMW 的输出光信号由单模光纤接收后传送到光谱分析仪 (Optical spectrum analyzer, OSA, YOKOGAWA AQ6375B) 进行分析处理。通过对多个 GADC 的测试发现,周期为 48.0 μm ,光栅区域长度为 816 μm 的 GADC 的性能最好。图 6(a) 与 (b) 给出了当光信号分别在 TMW 与 SMW 输入端激发各自的 E_{11}^s 模式时,自 TMW 与 SMW 输出的归一化传输谱,这里及随后的归一化均相对于光纤对光纤的传输光谱进行。由图 6(a) 可见,光信号自 TMW 输入时, TMW 的输出光谱在波长为 1 595.3 nm 处存在一个隔离度达到 14.8 dB 的阻带,而 SMW 的输出光谱则存在一个对应的通带,这说明在阻带波长附近, TMW 的 E_{11T}^s 模式耦合成为了 SMW 的 E_{11S}^s 模式。而当光信号自 SMW 输入时, SMW 的输出光谱在波长为 1 595.3 nm 处存在一个隔离度达到 13.6 dB 的阻带,而自 TMW 输出的光谱则存在一个对应的通带,这说明在阻带波长附近, SMW 的 E_{11S}^s 模式耦合成为了 TMW 的 E_{11T}^s 模式。根据图 6 所示的归一化传输谱,该 GADC 的 TMW 与 SMW 的插入损耗均约为 30.7 dB@1 593.3 nm,这里相对较大的插入损耗主要来自于光纤与铌酸锂薄膜波导模场失配和金属电极的吸收损耗。尽管通过增大二氧化硅缓冲层厚度可以减小金属吸收损耗,但会导致电光调谐效率下降。

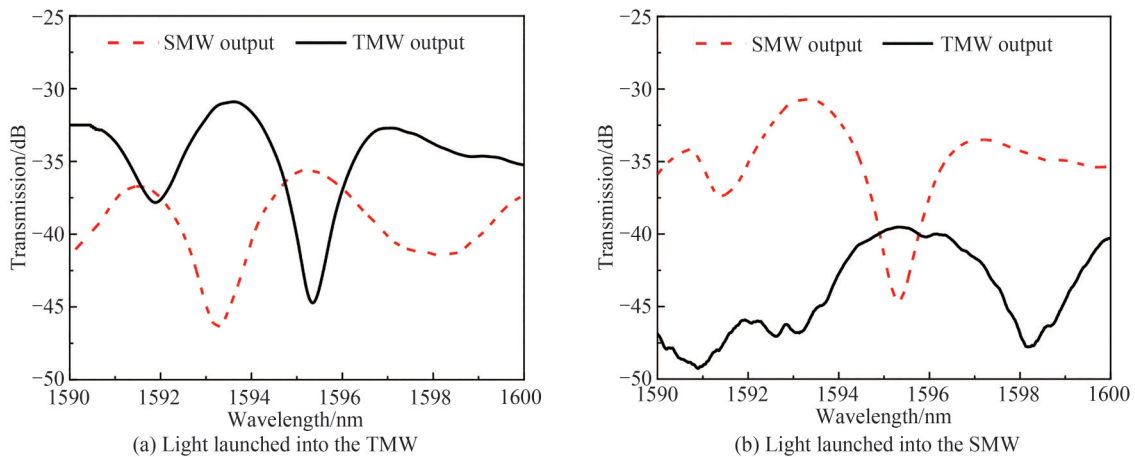


图 6 当宽带基模光信号分别耦合进入所制作的 GADC 的 TMW 与 SMW 时,在输出端测量得到的归一化传输谱
Fig.6 Normalized transmission spectra of our typical fabricated GADC when broadband light at fundamental mode was launched into the TMW and the SMW, respectively

为了进一步考察光信号经 GADC 后的耦合特性,并确认图 6(a) 中阻带是来自于 TMW 中 E_{11T}^s 向 SMW 中的 E_{11S}^s 的耦合导致,我们采用可调谐激光器 (OPEAK DFB-C-WTx) 作为光源,在 TMW 中激发 E_{11T}^s 模式,然后采用红外相机 (Micron Viewer 7290A) 采集 TMW 和 SMW 输出的近场光斑,其结果如图 7(a) 所示。可以看出,波长自 1 593.3 nm 逐渐调谐到 1 596.5 nm 的过程中, TMW 与 SMW 的输出的近场光斑的强度发生了明显的变化,在波长为 1 593.3 nm 时光波几乎都从 TMW 输出, SMW 输出的光很弱,说明在这一波长下非常微弱的模式耦合;而在波长为 1 595.3 nm 时光波则完全从 SMW 输出, TMW 基本没有输出,说明在这一波长下非常强的模式耦合;最后,在波长为 1 596.5 nm 时光波又逐渐耦合到 TMW 输出。上述的模式耦合特性与图 6(a) 呈现的结果完全一致,验证了图 6(a) 中 TMW 光谱的阻带是由 TMW 的 E_{11T}^s 模式耦合到 SMW 的 E_{11S}^s 模式所导致。此外,为了考察 TMW 中 E_{21T}^s 模式传输情况,仔细调整光纤对准 TMW 输入端的位置,使光纤中轴与波导中轴存在一定的偏移量从而在 TMW 中激发了 E_{21T}^s 模式。图 7(b) 给出了在 1 595.3 nm 波长时在输出端采集到的近场输出光斑,可以看出此时 E_{21T}^s 模式并没有耦合成为 E_{11S}^s 模式,说明设计的器件可以滤除 E_{11T}^s 模,但不会影响 E_{21T}^s 模的传输。

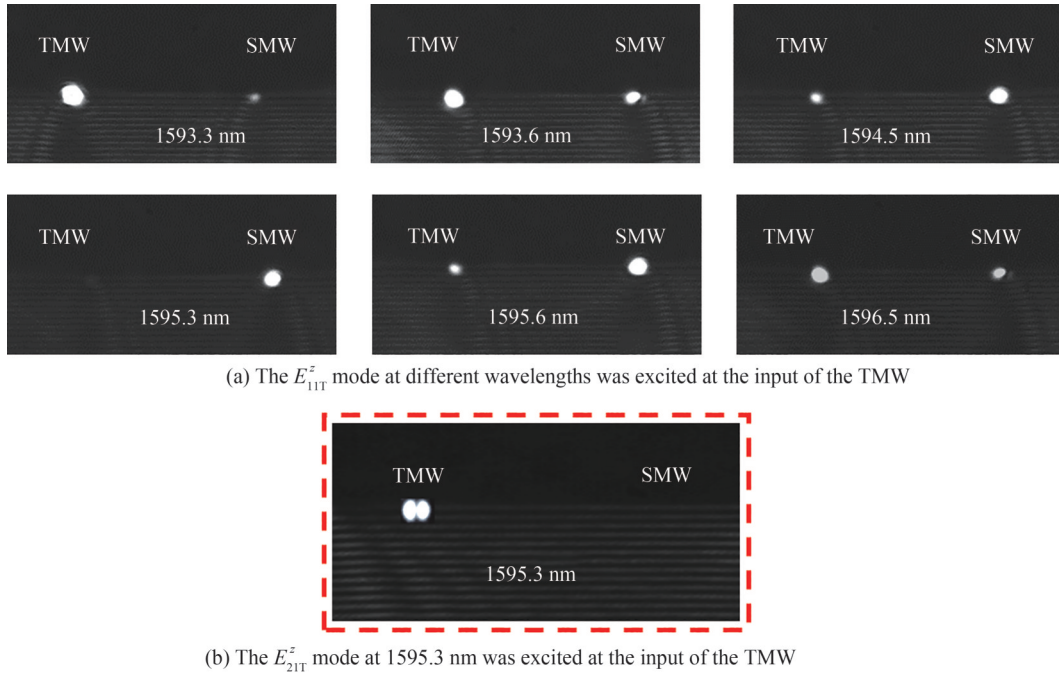


图7 不同波长的激光进入所制作的TMW中,监测到输出端的近场光斑

Fig.7 Output near-field patterns taken at the output of the TMW and the SMW of our typical fabricated GADC

为了方便进行器件的电光调谐及温度特性测试,在完成近场光斑测试后,将芯片进行了简单的光电封装。这里,我们仅针对上述测试中效果较好的一个GADC芯片采用上述高数值孔径光纤与波导两端进行光学耦合对准,在调节六维调节架同时观察光谱仪接收到的光谱情况,达到最佳效果时,进行紫外点胶曝光,耦合好的芯片粘接在玻璃片上,并通过金丝键合进行电极导线的连接,实现外部加载电压信号的功能,封装后的芯片如图8所示。

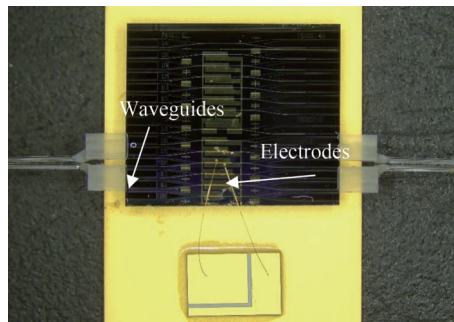


图8 封装后的GADC芯片的照片

Fig.8 Photograph of the packaged GADC chip

为了获取电光调谐特性,在电极上加载了不同的电压信号,并用光谱分析仪记录相应的传输谱。为方便描述,这里我们定义图1(a)中上方电极连接电源正极,下方电极连接电源负极时的电压为正电压,反之为负电压。图9(a)与(b)给出了测试所得的 E_{11T}^z 模式在TMW的归一化传输谱。从图9(a)可以看出,随着调谐电压从0 V增大到10 V,传输谱阻带中心波长从1595.3 nm红移到1599.0 nm,隔离度由14.8 dB下降到9.3 dB。而从图9(b)可以看出,当施加反向调谐电压从0 V变化到-8 V时,阻带波长从1595.3 nm蓝移到1592.3 nm。当电压为-2 V时,可在1594.5 nm波长处实现20.7 dB的最大隔离度。图9(c)给出了阻带中心波长随调谐电压变化情况,18 V的调谐电压可实现阻带中心波长移动6.7 nm,其调谐效率约为0.38 nm/V。

图10(a)给出了 E_{11s}^z 模式在SMW的归一化传输谱,随着调谐电压从0 V增大到9 V,传输谱阻带中心波长从1595.3 nm红移到1597.9 nm,隔离度由13.6 dB下降到9.1 dB。图10(b)给出了中心波长随调谐电压变化情况,9 V的调谐电压可实现阻带中心波长红移2.6 nm,其调谐效率约为0.29 nm/V。

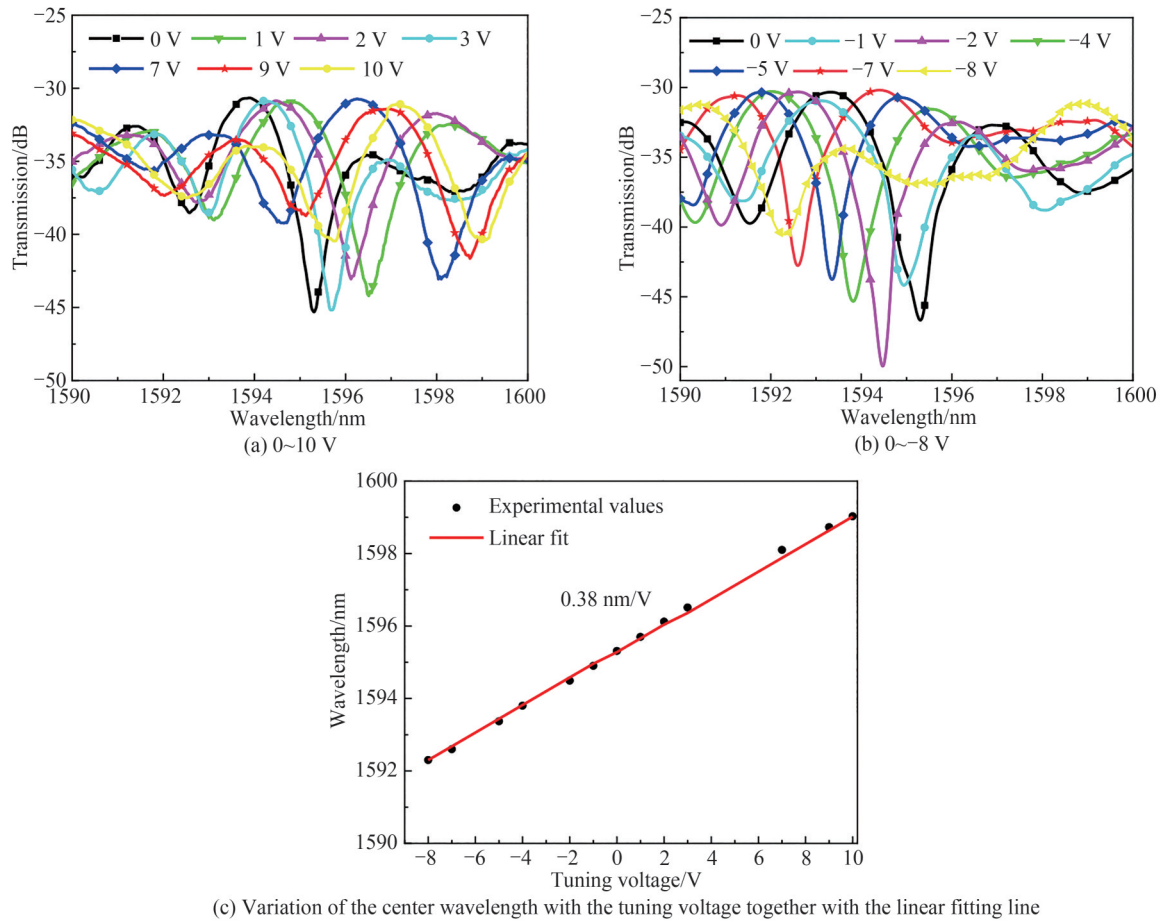


图9 所制作的典型的GADC器件的TMW在不同调谐电压的归一化传输谱及其阻带中心波长随调谐电压的变化
Fig.9 Normalized transmission spectra of the TMW of our typical fabricated GADC measured at different tuning voltages and variation of the center wavelength with the tuning voltage

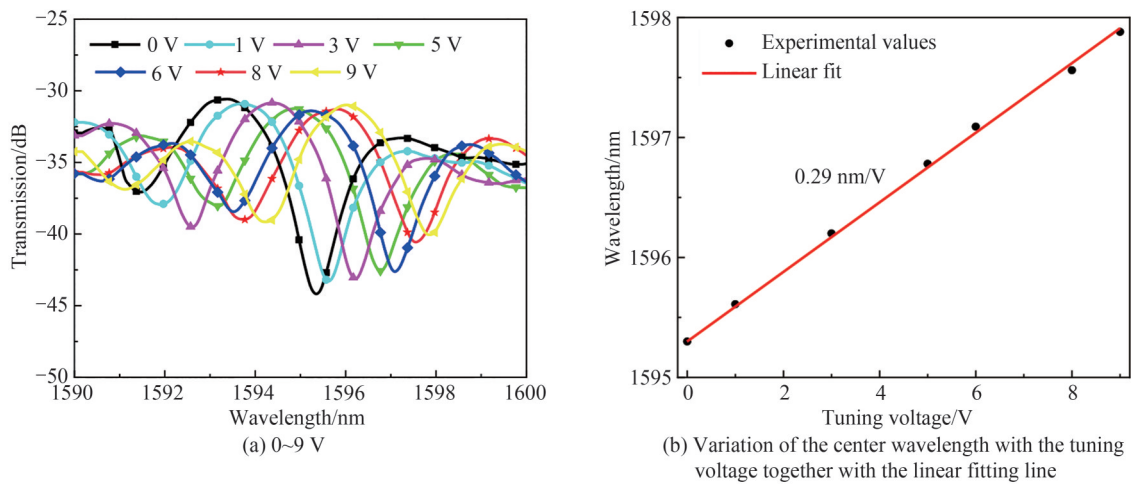


图10 所制作的典型的GADC器件的SMW在不同调谐电压的归一化传输谱及其阻带中心波长随调谐电压的变化
Fig.10 Normalized transmission spectra of the SMW of our typical fabricated GADC measured at different tuning voltages and variation of the center wavelength with the tuning voltage

完成了上述测试后,我们对电光调谐范围较宽的TMW通道进行了温度性能测试,将GADC置于热板上,通过热板加热,测量了温度从25℃(室温)变化到50℃时的传输谱变化情况,其结果如图11(a)所示。可以看出,在温度增加的过程中,传输谱阻带发生了红移,波长由1595.3 nm向长波长方向移动到1598.8 nm,热调谐效率为0.14 nm/℃。

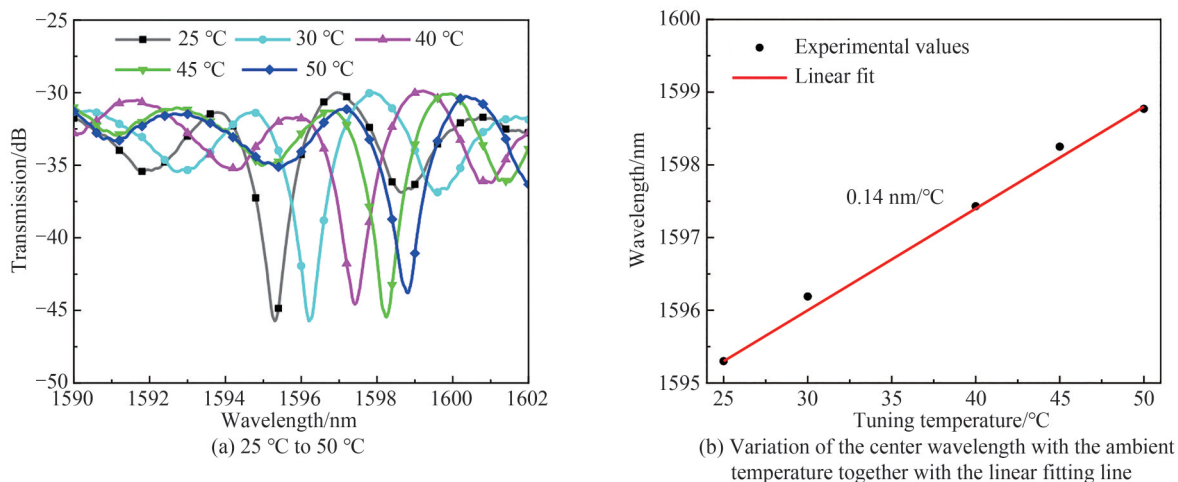


图11 所制作的GADC器件的TMW在不同环境温度下的归一化传输谱及其阻带中心波长随环境温度的变化
Fig.11 Normalized transmission spectra of the TMW of our typical fabricated GADC measured at different temperature and variation of the center wavelength with the ambient temperature

4 结论

本文设计、制作了一种电光调谐的侧壁LPWG辅助的铌酸锂薄膜光波导定向耦合器,器件的耦合区域长度仅为816 μm 。测试结果表明所制作的耦合器的TMW在波长为1595.3 nm处可实现14.8 dB的隔离度,并且经调谐后可在1594.5 nm波长处实现20.7 dB的最大隔离度。器件的TMW与SMW两个通道的电光调谐效率分别为0.38 nm/V和0.29 nm/V,而TMW通道的热调谐效率为0.14 nm/ $^{\circ}\text{C}$ (25 $^{\circ}\text{C}$ ~50 $^{\circ}\text{C}$)。我们提出的GADC具有紧凑的结构和较好的电光调谐性能,可应用于高速可调谐滤波、滤模、电光调制及高灵敏度温度传感等场景。

参考文献

- [1] SYMS R R A. Optical directional coupler with a grating overlay[J]. Applied Optics, 1985, 24(5): 717-726.
- [2] MARCUSE D. Directional couplers made of nonidentical asymmetric slabs part II: grating-assisted couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1987, 5(2): 268-273.
- [3] SHI Wei, WANG Xu, LIN C, et al. Silicon photonic grating-assisted, contra-directional couplers[J]. Optics Express, 2013, 21(3): 3633-3650.
- [4] BOROOJERDI M T, MÉNARD M, KIRK A G. Two-period contra-directional grating assisted coupler[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22865-22874.
- [5] QIU Huiye, SU Yuxia, LIN Fuzhong, et al. Silicon add-drop filter based on multimode grating assisted couplers[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(6): 7805308.
- [6] TIAN Liang, WANG Fei, WU Yuanda, et al. Polymer/silica hybrid integration add-drop filter based on grating-assisted contradirectional coupler[J]. Optics Letters, 2018, 43(10): 2348-2351.
- [7] QIU Huiye, JIANG Jianfei, YU Ping, et al. Narrow-band add-drop filter based on phase-modulated grating-assisted contra-directional couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(17): 3760-3764.
- [8] QIU Huiye, NIU Jinchun, LIANG Xiong, et al. Flat-top, sharp-edge add-drop filters using complementary-misalignment-modulated grating-assisted contradirectional couplers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(18): 5896-5901.
- [9] DAVIS J A, GRIECO A, SOUZA M C M M, et al. Hybrid multimode resonators based on grating-assisted counter-directional couplers[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16484-16490.
- [10] WANG Xu, ZHAO Yuhe, DING Yunhong, et al. Tunable optical delay line based on integrated grating-assisted contra-directional couplers[J]. Photonics Research, 2018, 6(9): 880-886.
- [11] ZHU Lin, SUN Junqiang, ZHOU Yong. Silicon-based wavelength division multiplexer using asymmetric grating-assisted couplers[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 23234-23248.
- [12] MU Debin, QIU Huiye, JIANG Jianfei, et al. A Four-Channel DWDM tunable add/drop demultiplexer based on silicon waveguide Bragg gratings[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(1): 6600708.
- [13] GUI Chengcheng, GAO Ya, ZHANG Zhonglai, et al. On-Chip silicon two-mode (de) multiplexer for OFDM/OQAM data transmission based on grating-assisted coupler[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 7905807.
- [14] NIE Xiaomin, TURK N N, LI Yang, et al. High extinction ratio on-chip pump-rejection filter based on cascaded grating-assisted contra-directional couplers in silicon nitride rib waveguides[J]. Optics Letters, 2019, 44(9): 2310-2313.

- [15] KWON M S. Silicon photonic add-drop filter based on a grating-assisted co-directionally coupled vertical hybrid structure [J]. *Optics Express*, 2019, 27(8): 11748-11765.
- [16] LIU Feng, HIER H, WORCHESKY T L. Dual-side processed demultiplexer using grating-assisted codirectional coupler [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(3): 600-602.
- [17] ALFERNESS R C, KOCH T L, BUHL L L, et al. Grating assisted InGaAsP/InP vertical codirectional coupler filter [J]. *Applied Physics Letters*, 1989, 55(19): 2011-2013.
- [18] AHN S W, SHIN S Y. Grating-assisted codirectional coupler filter using electrooptic and passive polymer waveguides [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(5): 819-825.
- [19] LI Junhui, ZHOU Maohui, YAO Hao, et al. Grating-assisted directional coupler in lithium niobate for tunable mode filtering [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(2): 6600807.
- [20] WANG Yan, CHEN Kaixin, WANG Lingfang, et al. Sidewall-grating-assisted polymer-waveguide directional coupler for forward coupling of fundamental modes [C]. *ACP*, 2015: ASu3A.3.
- [21] WANG Yiping, CHENG Jianping, LI Xinwan, et al. Fast tunable electro-optic polymer waveguide gratings [C]. *SPIE*, 2005, 5632: 587-593.
- [22] ZHANG Weifeng, EHTESHAMI N, LIU Weilin, et al. Silicon-based on-chip electrically tunable sidewall Bragg grating Fabry-Perot filter [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3153-3156.
- [23] JIN Wei, CHIANG K S. Reconfigurable three-mode converter based on cascaded electro-optic long-period gratings [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 4500906.
- [24] D'ALESSANDRO A, DONISI D, SIO L D, et al. Tunable integrated optical filter made of a glass ion-exchanged waveguide and an electro-optic composite holographic grating [J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9254-9260.
- [25] LI Junhui, CHEN Kaixin. Electro-optic tunable grating-assisted optical waveguide directional coupler in lithium niobate [J]. *Applied Physics B*, 2023, 129:39.
- [26] ZHU Di, SHAO Linbo, YU Mengjie, et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2021, 13(2): 242-352.
- [27] HE Mingbo, XU Mengyue, REN Yuxuan, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobite Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit/s and beyond [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(5): 359-364.
- [28] WANG Mengke, LI Junhui, YAO Hao, et al. Thin-film lithium-niobate modulator with a combined passive bias and thermo-optic bias [J]. *Optics Express*, 2022, 30(22): 39706-39715.
- [29] GAO Renhong, YAO Ni, GUAN Jianglin, et al. Lithium niobate microring with ultra-high Q factor above 10^8 [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 011902.
- [30] ABDELSALAM K, ORDOUIE E, VAZIMALI M G, et al. Tunable dual-channel ultra-narrowband Bragg grating filter on thin-film lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2730-2733.
- [31] LI Xuepeng, CHEN Kaixin, WANG Lingfang. Compact and electro-optic tunable interleaver in lithium niobate thin film [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3610-3613.
- [32] ZHANG Mengruo, CHEN Kaixin, WANG Mengke, et al. Electro-optic reconfigurable two-mode (de) multiplexer on thin-film lithium niobate [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1001-1004.
- [33] LIU Qing, CHIANG K S, RASTOGI V. Analysis of corrugated long-period gratings in slab waveguides and their polarization dependence [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(12): 3399-3405.

Electro-optic Tunable Grating-assisted Optical Waveguide Directional Coupler in Lithium Niobate on Insulator

LI Junhui, YAO Hao, DENG Jiayao, CHEN Kaixin

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Grating Assisted Directional Coupler (GADC) is an important optical waveguide device because it is capable of achieving efficient coupling between the two modes having mismatched phase. GADC provides a new way to improve the performances of the coupler and the grating. Due to its compact structure, easy integration, versatility, and good wavelength selectivity, GADC is now widely used in various scenarios, such as codirectional coupler, optical add-drop filter, tunable delay line, wavelength division multiplexer, mode division multiplexer, filter, mode filter, and so on. However, most of these

devices do not have tunability, while tunability is the key for improving the device performance, realizing device reconfiguration, and enlarging the device fabrication tolerance. Up to now, the tunability of optical waveguide devices are usually realized based on the Electro-Optic (EO) and the Thermo-Optic (TO) effects. Among them, EO tuning is more fascinating due to its high tuning speed and low power consumption. Lithium Niobite (LN) On Insulator (LNOI), a newly emerging integrated optics platform in recent years, not only keeps the excellent EO, acousto-optic, and nonlinear optical properties of LN, but also enables high-index-contrast and hence high-confinement waveguide, which makes it an excellent platform for developing compact and high-performance EO devices.

In this paper, a high-performance electro-optical tunable GADC in LNOI is proposed and demonstrated. Our proposed device consists of an Asymmetric Directional Coupler (ADC), a sidewall Long Period Waveguide Grating (LPWG), and a set of electrodes. The ADC is composed of a Single-Mode Waveguide (SMW) and a Two-Mode Waveguide (TMW), and both are rib waveguides with identical etch depth. The LPWG is formed on the inner side of the ridge of the TMW. Both ADC and the LPWG are formed with the Inductively Coupled Plasma (ICP) process simultaneously. Due to the large birefringence of LN, the LPWG can not meet the phase matching of the two polarized fundamental modes in the SMW and the TMW simultaneously, thus it is designed only for the coupling of the E_{11T}^z and E_{11S}^z modes. To employ the maximum EO coefficient γ_{33} of LN, a 600-nm thick x -cut LN wafer and y -propagation layout are adopted. And Titanium (Ti) gold electrodes are placed both sides of the TMW to provide EO tuning. Here, to avoid the light absorption induced by the metal electrode, a Silicon Dioxide (SiO_2) buffer layer is formed on the LNOI waveguides to isolate the waveguides from the electrodes. In this work, the width of the SMW and the TMW are set to 1.2 μm and 2.0 μm , respectively, the space between them is set to 0.7 μm , and the etch depth is set to 200 nm. With these data, the grating period is 48.0 μm at the resonant wavelength of 1 550 nm and the grating length is 816 μm , corresponding to 17 grating periods, calculated by using the beam propagation method (Rsoft) to simulate the light propagation through the grating when the grating duty cycle is set to 50%.

We fabricated dozens of GADCs with somewhat different periods on a single x -cut LNOI chip. When the E_{11T}^z mode is excited in the TMW, the transmission spectrum of the TMW exhibits a distinct rejection band with a maximum contrast of 14.8 dB at the center wavelength 1 595.3 nm, while the output spectrum of the SMW exhibits somewhat complementary pass-band. This indicates that the E_{11T}^z mode of the TMW is coupled into the E_{11S}^z mode of the SMW near the rejection band. In addition, when the E_{11S}^z mode is excited in the SMW, the output spectrum of the SMW exhibits a distinct rejection band with an isolation of 13.6 dB at the wavelength of 1 595.3 nm, while the spectrum output from the TMW exhibits a distinct complementary pass-band near the rejection band, indicating an efficient coupling from the E_{11S}^z mode of the SMW to the E_{11T}^z mode of the TMW.

To facilitate the investigation of the EO and TO tunability of the device, we further packaged GADC unit on the chip. The two ends of the TMW and the SMW of GADC were pigtailed with 3.2 μm UHNAF fiber arrays (with two fibers) using UV glue. The measured results show that the central wavelength of the rejection band of the TMW transmission spectrum redshifts from 1 595.3 nm to 1 599.0 nm as the tuning voltage increases from 0 V to 10 V, the maximum contrast of 14.8 dB at the center wavelength 1 595.3 nm. While the center wavelength of the rejection band moves from 1 595.3 nm to 1 592.3 nm as the tuning voltage changes from 0 V to -8 V, and the isolation reaches its maximum value of 20.7 dB at -2 V. The EO tuning efficiencies are 0.38 nm/V (1 592.3~1 599.0 nm). Similarly, the center wavelength of the rejection band of the SMW transmission spectrum moves from 1 595.3 nm to 1 597.9 nm as the tuning voltage changes from 0 V to 9 V and the isolation reaches its maximum value of 18.4 dB at -2 V. The EO tuning efficiencies is 0.29 nm/V.

Finally, the TO tuning feature of the packaged GADC was also evaluated by investigating the shift of the center wavelength of the rejection band in the TMW transmission spectrum with the change of the ambient temperature. The center wavelength of the rejection band redshifts from 1 595.3 nm to 1 598.8 nm when the ambient temperature changes from 25 $^{\circ}\text{C}$ to 50 $^{\circ}\text{C}$. The TO tuning efficiency is 0.14 nm/ $^{\circ}\text{C}$. Our proposed LNOI GADC can find applications in the fields of high-speed tunable wavelength filtering, mode filtering, and EO modulation.

Key words: Grating-assisted directional coupler; Long-period waveguide grating; Lithium niobite on insulator; Electro-optic tuning; Thermo-optic tuning

OCIS Codes: 130.3120; 230.2090; 060.1810; 230.7370; 310.2785