

基于夹层结构的偏振无关 1×2 定向耦合型解复用器的设计

汪静丽 陈子玉 陈鹤鸣

Design of polarization-insensitive 1×2 directional coupler demultiplexer based on sandwiched structure

Wang Jing-Li Chen Zi-Yu Chen He-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 014202 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20200721

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200721>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ 三明治结构的偏振无关 1×2 多模干涉型解复用器的设计

Design of polarization-insensitive 1×2 multimode interference demultiplexer based on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ sandwiched structure

物理学报. 2020, 69(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191449>

可实现偏振无关单向传输的二维硅基环形孔光子晶体

Two-dimensional silicon annular photonic crystals for realizing polarization-independent unidirectional transmission

物理学报. 2019, 68(2): 024206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181397>

太赫兹双芯反谐振光纤的设计及其耦合特性

Design and coupling characteristics of terahertz dual-core anti-resonant fiber

物理学报. 2020, 69(20): 208703 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200662>

基于光子晶体光纤交叉敏感分离的磁场温度传感研究

Simultaneous measurement of magnetic field and temperature based on photonic crystal fiber with eliminating cross-sensitivity

物理学报. 2018, 67(18): 184212 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180680>

飞秒激光直写光量子逻辑门

Femtosecond laser direct writing of optical quantum logic gates

物理学报. 2019, 68(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190024>

基于原位等离子体氮化及低压化学气相沉积-Si₃N₄栅介质的高性能AlGa_{0.5}N/GaN MIS-HEMTs器件的研究

High-performance AlGa_{0.5}N/GaN MIS-HEMT device based on in situ plasma nitriding and low power chemical vapor deposition Si₃N₄ gate dielectrics

物理学报. 2017, 66(19): 197301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.197301>

基于夹层结构的偏振无关 1×2 定向耦合型解复用器的设计*

汪静丽^{1)†} 陈子玉¹⁾ 陈鹤鸣²⁾

1) (南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 南京 210023)

2) (南京邮电大学贝尔英才学院, 南京 210023)

(2020 年 5 月 13 日收到; 2020 年 5 月 13 日收到修改稿)

提出一种基于夹层结构的偏振无关 1×2 定向耦合型解复用器, 用于分离 1310 nm 和 1550 nm 两个波长. 通过合理选择夹层结构芯区的折射率及波导间隙, 可以调节同一波长两个正交偏振模的耦合长度相等, 实现偏振无关; 通过合理选择夹层结构波导宽度, 可以使两个波长分别从不同输出波导端口输出, 实现解复用功能. 运用三维有限时域差分法进行建模仿真, 对结构参数进行优化, 并对器件性能进行了分析. 结果表明: 该器件定向耦合波导的长度为 23 μm , 插入损耗低至 0.1 dB, 输出波导间的串扰低至 -26.23 dB, 3 dB 带宽可达 290 nm 和 200 nm. 另外, 本文提出的器件采用 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 平台, 可有效减小波导尺寸, 提高集成度, 不仅实现了偏振无关, 而且结构紧凑、损耗低, 在未来的集成光路中具有潜在的应用价值.

关键词: 定向耦合, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 平台, 偏振无关, 夹层结构**PACS:** 42.79.-e, 42.82.-m**DOI:** 10.7498/aps.70.20200721

1 引言

随着时代的发展, 人们对通信速率及容量的需求越来越高, 波分复用技术作为提高通信容量的典型解决方案得到了广泛研究. 解复用器是波分复用技术中的核心器件, 用于分离多个波长, 最常见的器件结构包括马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder Interferometers, MZI) 型^[1]、多模干涉 (multimode interference, MMI) 型^[2]、光子晶体 (photonic crystal, PhC) 型^[3]、阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 型^[4]、定向耦合器 (directional coupler, DC) 型^[5-6]等. 其中, MZI 型解复用器尺寸偏大且高损耗; MMI 型、PhC 型和 AWG 型解复用器偏振依赖性高且带宽较低; 而 DC 型解复用器因其结

构简单、损耗低及带宽高, 在光子集成方面得到了广泛应用.

迄今为止, 大多数 DC 型解复用器是在绝缘体上硅 (silicon-on-insulator, SOI) 平台实现的, 尺寸及损耗偏大, 影响光子集成度. 例如, 文献 [5] 提出了一种基于 SOI 波导的偏振有关单纤三向器, 其中 DC 波导的长度约等于 6.3 mm, 平均串扰约等于 -18 dB; 文献 [6] 提出了一种基于 SOI 波导的偏振有关单纤三向器, 其中 DC 波导的长度约等于 8.3 mm, 平均串扰约等于 -20 dB. 因此一种新的波导材料 Si_3N_4 ^[7-9] 应运而生, 成为研究热点. 采用低压化学气相沉积方法在 SiO_2 上生长的 Si_3N_4 薄膜具有结构稳定、损耗低、禁带宽度宽等优点, 有利于提高光子集成度. 与 SOI 平台相比, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 平台表现出了损耗低、工艺容差性好及灵活性高等

* 国家自然科学基金 (批准号: 61571237)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK20151509)、南京邮电大学校级科研基金 (批准号: NY217047) 和横向课题 (批准号: 2017 外 65) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

诸多优势.

此外, 大部分 DC 型解复用器都是偏振相关^[10–12]的, 即仅考虑某一个偏振模, 这大大限制了其应用范围. 实际上, 正是由于横电模 (transverse electric mode, TE) 和横磁模 (transverse magnetic mode, TM) 的耦合长度不同, 从而导致了 DC 型器件无法实现偏振无关. 为解决这一问题, 人们也陆续提出了若干结构用于调节 TE 和 TM 偏振模的耦合长度相等. 例如基于滞后效应制备中间有浅槽的非对称波导^[13]; 采用弯曲 DC 波导结构^[14]; 以及采用脊形波导结构^[15]等. 这些结构虽然实现了器件的偏振无关, 但同时还存在着尺寸较大、带宽较小和损耗较大等缺点.

本文提出了一种基于 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ 夹层结构的偏振无关 1×2 DC 型解复用器. 通过合理选择夹层结构芯区的折射率及波导间隙, 可以调节同一波长两个正交偏振模的耦合长度相等, 实现偏振无关; 通过合理选择夹层结构波导宽度, 可以使两个波长分别从不同输出波导端口输出, 实现解复用功能. 采用三维有限时域差分法 (three-dimensional finite-difference time-domain, 3 D-FDTD) 进行建模和分析, 结果表明: 器件尺寸较小, DC 波导的长度仅为 $23 \mu\text{m}$, 仅为文献^[15]中 DC 波导长度的一半. 同时性能优越, 损耗低且带宽高, 在未来的集成光路中具有潜在的应用价值.

2 工作原理与器件结构设计

2.1 DC 工作原理

DC 波导由两根相距较近的直波导构成, 根据耦合模理论^[16], 当两根波导靠的很近时, 波导之间会发生横向耦合, 在光的传输方向上, 光能量会周期性地两根波导中进行转移.

最常见的 DC 结构由两根结构参数完全相同的平行直波导组成, 它们满足相位匹配条件, 当光从第 1 根波导输入时, 两根波导中的能量随着传输长度的增加周期性变化. 在特定的长度 L_c 下, 光能量第 1 次 100% 转移至另一根波导中, L_c 可表示为

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o}, \quad (1)$$

其中, L_c 被称作耦合长度, β_e 和 β_o 分别是偶模和奇模的传播常数.

2.2 夹层结构实现偏振无关的原理

顾名思义, 夹层结构即是 A/B/A 结构, 它由 3 层材料依次沉积而成, 其中 A 与 B 材料的折射率不等. 假设 $n_0 > n_1$, 由于高、低折射率材料间的电场不连续性, TE 和 TM 偏振模将被局域在不同的材料层传输. 夹层结构常用于设计偏振无关器件^[17–19], 例如文献^[19]将 MMI 波导结构与夹层结构相结合, 通过调整中间层材料的折射率使得 TE 和 TM 偏振模的拍长相等, 从而实现偏振无关功能.

本文将夹层结构应用于 DC 波导结构中, 若要实现偏振无关功能, 即要求同一波长的两个正交偏振模的 L_c 相等. 如果仅对中间层材料的折射率进行调整, 经 3 D-FDTD 建模仿真表明: TE 偏振模的耦合长度总是大于 TM 偏振模的耦合长度, 无法实现偏振无关. 因此提出了一种新型夹层结构, 如图 1(a) 所示, n_e 和 n_s 分别为包层和衬底的折射率, 中间 B 材料层的折射率为 n_0 , 波导宽度为 W_1 ; 两侧 A 材料层的折射率为 n_1 , 波导宽度为 W_0 , 且 $W_1 > W_0$. 通过调节 W_0 和 W_1 的值, 可以使得 DC 波导结构中输入波长的 TE 和 TM 偏振模的耦合长度相等, 从而实现偏振无关. TE 和 TM 偏振模在夹层波导中的场分布如图 1(b) 和图 1(c) 所示, TE 偏振模局域在中间 B 材料层传输, TM 偏振模则局域在两侧 A 材料层传输.

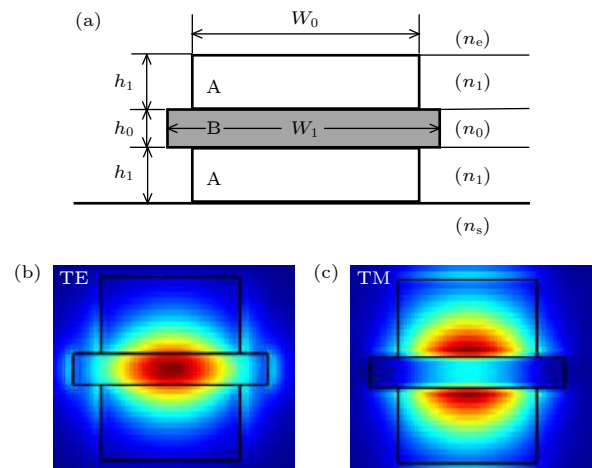


图 1 (a) 夹层结构示意图; (b) TE 偏振模在夹层波导中的场分布 ($n_0 > n_1$); (c) TM 偏振模在夹层波导中的场分布 ($n_0 > n_1$)

Fig. 1. (a) schematic configuration of the sandwiched structure; (b) field distributions for the TE fundamental mode in a sandwiched waveguide ($n_0 > n_1$); (c) field distributions for the TM fundamental mode in a sandwiched waveguide ($n_0 > n_1$).

2.3 器件结构设计

所设计的 DC 型解复用器结构示意图如图 2(a) 所示: 器件由 DC 波导、S 波导和输出波导 3 部分构成, 其中 DC 波导结构由两根平行直波导 A 和 B 组成, 且波导 A 和 B 的结构参数完全相同. L_{DC} 为 DC 波导的长度, W_0 和 W_1 分别为不同材料层的波导宽度, g_0 和 g_1 分别为波导 A 和 B 的不同材料层之间的波导间隙, S 波导的长度和宽度分别为 $L_s = 12 \mu\text{m}$ 和 $W_s = 2.5 \mu\text{m}$. 所有波导均采用夹层结构, 以 DC 波导为例, 如图 2(b) 所示, Si_3N_4 层波导的高度和宽度分别为 $h_1 = 0.25 \mu\text{m}$ 和 W_0 ; SiN_x 层波导的高度和宽度分别为 $h_0 = 0.1 \mu\text{m}$ 和 W_1 ; 与之对应的, g_0 为 Si_3N_4 层波导之间的间隙, g_1 为 SiN_x 层波导之间的间隙. 离子辅助沉积方法可调节中间层 SiN_x [20–21] 的折射率 $n(\text{SiN}_x)$ 在 1.72—3.43 范围内变化, Si_3N_4 的折射率约为 2; 另外 S 波导、输出波导与 DC 波导具有类似的截面结构, 不再赘述.

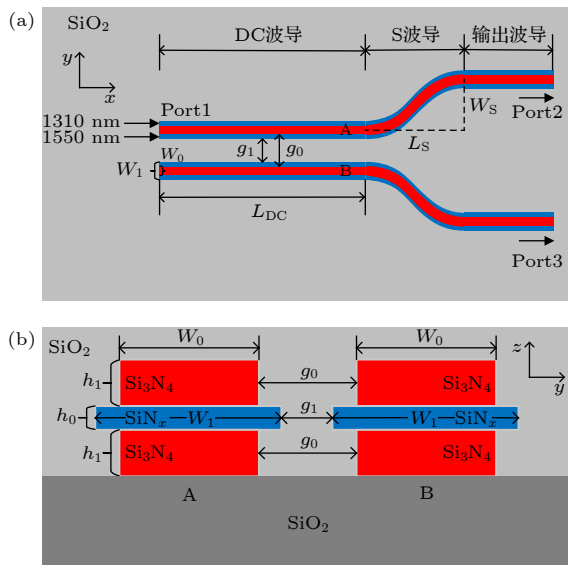


图 2 解复用器结构示意图 (a) 俯视图; (b) DC 波导截面示意图

Fig. 2. Schematic configuration of the demultiplexer structure: (a) Top view; (b) cross section of the DC waveguide.

3 器件功能实现与性能分析

3.1 偏振无关功能的实现

首先设计夹层结构, 用于实现同一波长的两个正交偏振模的 L_c 相等, 达到偏振无关的目的. 若要实现器件的偏振无关, 需要满足 (2) 式.

$$L_c(\lambda, \text{TE}) = L_c(\lambda, \text{TM}), \quad (2)$$

其中, $L_c(\lambda, \text{TE})$ 和 $L_c(\lambda, \text{TM})$ 分别表示波长为 λ 时的 TE 偏振模和 TM 偏振模的耦合长度.

图 3 给出了当 $W_0 = 0.6 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, $g_1 = 0.1 \mu\text{m}$ 时, 不同波长、不同偏振模的 L_c 和 $\Delta L_c(\lambda)$ (其中 $\Delta L_c(\lambda) = L_c(\lambda, \text{TE}) - L_c(\lambda, \text{TM})$) 随 $n(\text{SiN}_x)$ 的变化关系. 当 $\Delta L_c(\lambda) = 0$ 时, 满足偏振无关条件 (2) 式, 此时器件可实现偏振无关. 图 3(a) 中虚线表示模式在传输过程中严重衰减; 实线则表示模式在传输过程中损耗低. 因此, 为保证传输质量, $n(\text{SiN}_x)$ 需满足大于等于 2.7. 此外, 随着 $n(\text{SiN}_x)$ 的增大, 同一波长所对应的两个正交偏振模的 L_c 均随之单调增加, 且 $L_c(\lambda, \text{TE})$ 的增长幅度大于 $L_c(\lambda, \text{TM})$. 由图 3(b) 可知, 随着 $n(\text{SiN}_x)$ 的增大, 无论是波长 1310 nm 还是 1550 nm, 其 $\Delta L_c(\lambda)$ 均呈现由负到正的变化, 且单调递增. 当 $|\Delta L_c(\lambda)|$ 大时, $L_c(\lambda, \text{TE})$ 与 $L_c(\lambda, \text{TM})$ 差值也大, 实现器件的偏振无关比较困难, 因此希望 $n(\text{SiN}_x)$ 尽量偏小. 综上, 选取 $n(\text{SiN}_x) = 2.7$, 图 3(a) 中用绿色环

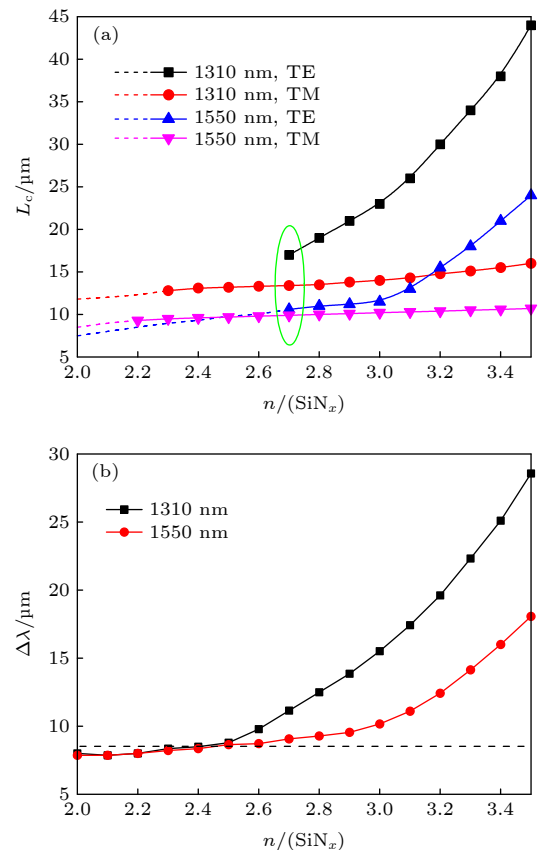


图 3 当 $W_0 = 0.6 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, $g_1 = 0.1 \mu\text{m}$ 时, (a) L_c , (b) $\Delta L_c(\lambda)$ 随 $n(\text{SiN}_x)$ 的变化关系

Fig. 3. (a) L_c , (b) $\Delta L_c(\lambda)$ as a function of $n(\text{SiN}_x)$ when $W_0 = 0.6 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, $g_1 = 0.1 \mu\text{m}$.

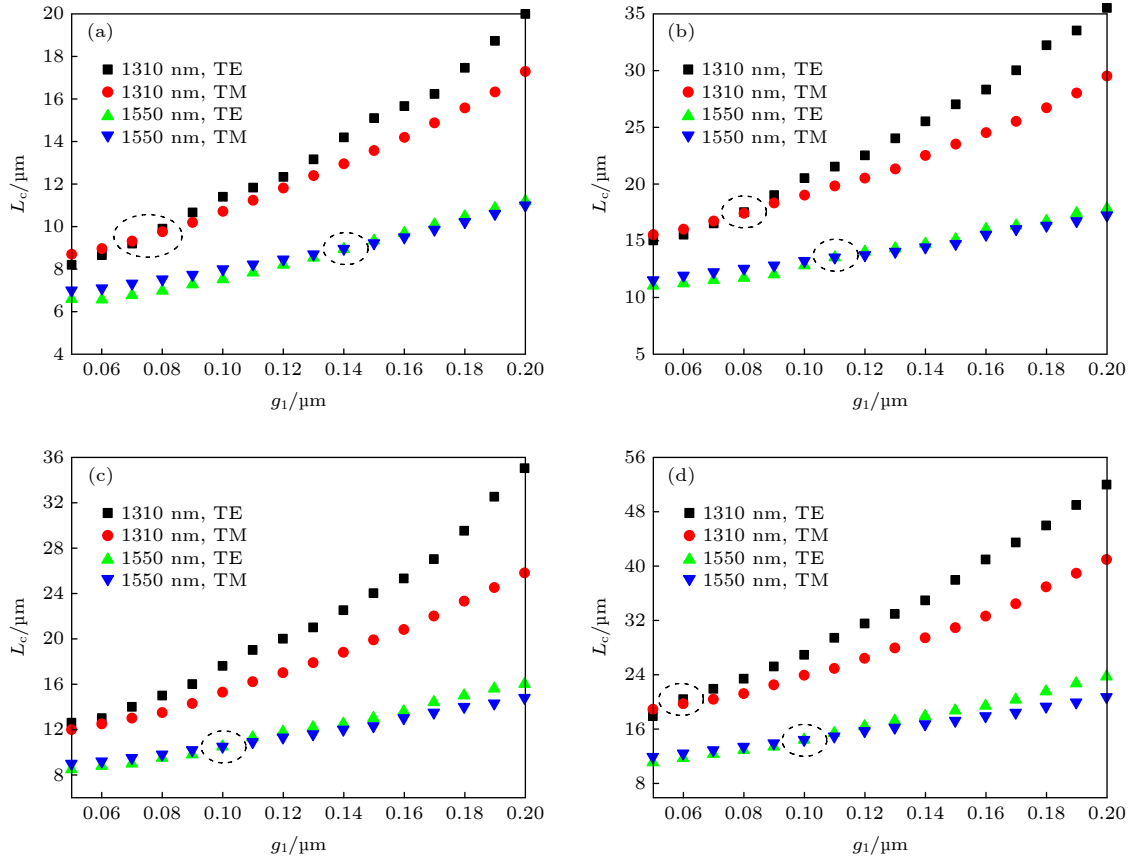


图 4 当 (a) $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.6 \mu\text{m}$, (b) $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, (c) $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, (d) $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$ 时, L_c 随 g_1 的变化关系

Fig. 4. L_c as a function of g_1 when (a) $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.6 \mu\text{m}$, (b) $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, (c) $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, (d) $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$.

标注出了此时所有 L_c 的值, 它们并不完全相等. 这在图 3(b) 中更加明显, 当 $n(\text{SiN}_x) = 2.7$ 时, 两个波长所对应的 $|\Delta L_c(\lambda)|$ 均不等于零.

为了实现偏振无关性能, 需要进一步探讨夹层波导的结构参数 W_0 , W_1 及波导间隙 g_1 对不同波长的两个正交偏振模的 L_c 的影响. 本文选取了若干组 W_0 和 W_1 的值, 且 g_1 的值在 $0.05\text{--}0.2 \mu\text{m}$ 范围内变化, 观察 L_c 随 g_1 的变化关系. 图 4 给出了不同结构参数时, L_c 随 g_1 的变化关系, 其中图 4(a)—(d) 对应的结构参数依次为 $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.6 \mu\text{m}$; $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$; $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$; $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$. 由图 4 可知, 随着 W_0 和 W_1 值的增大, 两个波长所分别对应的两个正交偏振模的 L_c 均随之增大; 随着 g_1 的增大, 同一波长所对应的两个正交偏振模的 L_c 均随之单调增加, 且 $L_c(\lambda, \text{TE})$ 的增长幅度大于 $L_c(\lambda, \text{TM})$, 从而使得两者存在交叉点, 交叉点处 $L_c(\lambda, \text{TE}) = L_c(\lambda, \text{TM})$ (图 4 中的虚线环标示

了各个交叉点).

虽然对于 1310 nm 和 1550 nm 两个波长来说, 交叉点所对应的 g_1 并不相同, 但是值得注意的是, $\Delta L_c(1310 \text{ nm})$ 随着 g_1 的增大而有明显地增加, 而 $\Delta L_c(1550 \text{ nm})$ 随着 g_1 的增大变化幅度较小, 在 0 附近波动, 如图 5 所示. 因此, 合理选择 g_1 , 可以使得 $\Delta L_c(1310 \text{ nm})$ 逐渐趋于 0, 而 $\Delta L_c(1550 \text{ nm})$ 本身就对 g_1 的变化不敏感, 在 0 附近波动, 最终使得两个波长均满足 (3) 式,

$$L_c(\lambda, \text{TE}) \approx L_c(\lambda, \text{TM}), \quad (3)$$

可以较好地实现器件的偏振无关.

3.2 波长分离功能的实现

当各个波长的偏振无关功能实现后, 需要在此基础上实现多波长的分离功能. Port2 和 Port3 的归一化输出功率^[22,23] 可以表示为:

$$P_{\text{bar}} = \cos^2[(\pi/2) \cdot (L_{\text{DC}}/L_c)], \quad (4)$$

$$P_{\text{cross}} = \sin^2[(\pi/2) \cdot (L_{\text{DC}}/L_c)], \quad (5)$$

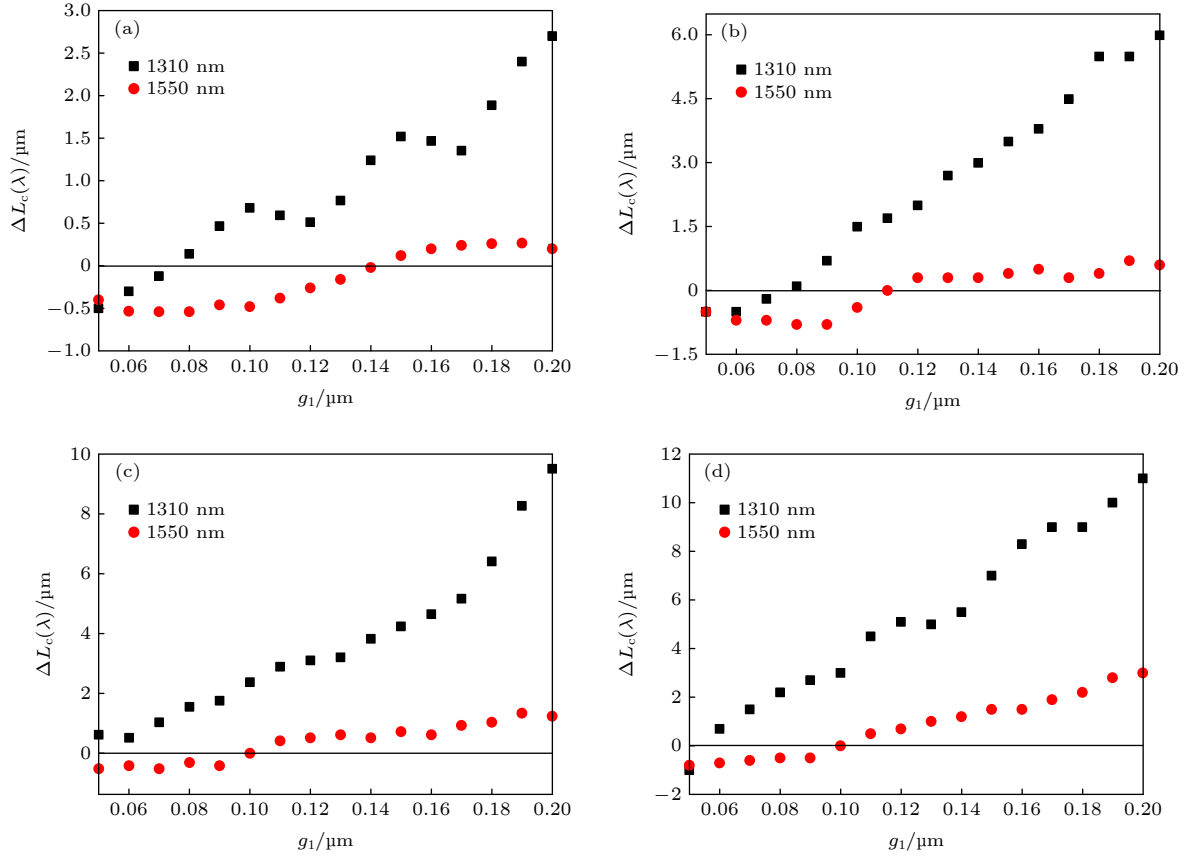


图 5 当 (a) $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.6 \mu\text{m}$, (b) $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, (c) $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, (d) $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$ 时, $\Delta L_c(\lambda)$ 随 g_1 的变化关系

Fig. 5. $\Delta L_c(\lambda)$ as a function of g_1 when (a) $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.6 \mu\text{m}$, (b) $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, (c) $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$, (d) $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$.

其中, P_{bar} 是 Port2 的输出功率, P_{cross} 是 Port3 的输出功率. 为了实现波长分离功能, 引入一个功率参数 P :

$$P = \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_{\text{DC}}}{L_c(1310 \text{ nm})} \right) + \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_{\text{DC}}}{L_c(1550 \text{ nm})} \right), \quad (6)$$

其中, $L_c(1310 \text{ nm})$ 和 $L_c(1550 \text{ nm})$ 分别表示输入波长为 1310 nm 和 1550 nm 时的耦合长度. 当且仅当 P 值等于 0 或者 2 时, 即当两个波长在 DC 波导中传输时, 其中一个波长发生奇数次耦合, 同时另一个波长发生偶数次耦合, 此时 1310 nm 和 1550 nm 两个波长将分别从两个输出端口输出, 实现波长分离.

因此, 当器件的设计同时满足 (3) 式和 (6) 式时, 即可实现偏振无关功能和波长分离功能. 表 1 给出了几组不同的 W_0 和 W_1 , 通过优化仿真, 可以确定同时满足 (3) 式和 (6) 式时对应的 g_1 和 L_{DC} .

由表 1 可知, 当 $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$ 时, 器件的尺寸最小, L_{DC} 仅为 $23 \mu\text{m}$. 同时对表 1 所涉及的 DC 型偏振无关解复用器的性能指标分别进行了仿真计算, 给出了不同波长的两个正交偏振模的透过率. 如表 2 所示, 当 $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$ 或者 $W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.9 \mu\text{m}$ 时, 透过率指标整体最优. 综合表 1 和表 2 可知, 当 DC 型解复用器的结构参数为 $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $g_1 = 0.08 \mu\text{m}$ 时, 器件尺寸小, 性能指标优越.

表 1 DC 型偏振无关解复用器的结构参数

Table 1. Structural parameters of the polarization-insensitive DC demultiplexer.

结构参数	P	$g_1/\mu\text{m}$	$L_{\text{DC}}/\mu\text{m}$
$W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.6 \mu\text{m}$	0	0.08	26.5
$W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$	2	0.08	27
$W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$	0	0.08	23
$W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$	2	0.07	26
$W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$	2	0.06	37
$W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.9 \mu\text{m}$	0	0.07	35

表 2 DC 型偏振无关解复用器的透过率

Table 2. Transmittance of the polarization-insensitive DC demultiplexer.

结构参数	$T(1310$ nm, TE)	$T(1310$ nm, TM)	$T(1550$ nm, TE)	$T(1550$ nm, TM)
$W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.6 \mu\text{m}$	0.942	0.931	0.81	0.8
$W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$	0.941	0.936	0.82	0.814
$W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$	0.977	0.964	0.93	0.84
$W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.7 \mu\text{m}$	0.925	0.95	0.84	0.87
$W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$	0.96	0.964	0.907	0.848
$W_0 = 0.5 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.9 \mu\text{m}$	0.98	0.967	0.853	0.916

综上, 当参数取 $L_{\text{DC}} = 23 \mu\text{m}$, $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $g_1 = 0.08 \mu\text{m}$, $n(\text{SiN}_x) = 2.7$ 时, 可以实现偏振无关的 1×2 DC 型解复用器. 此时 1310 nm 和 1550 nm 2 个波长所对应的 2 个正交偏振光信号传播的光场分布如图 6 所示: 1310 nm 的两个偏振模传输了 $L_c(1310 \text{ nm})$ 的距离, 经由 S 波导从输出端口 Port3 输出; 1550 nm 的两个偏振模传输了 $2 \times L_c(1550 \text{ nm})$ 的距离, 经由 S 波导从输出端口 Port2 输出. 设计的器件成功分离了 1310 nm 和 1550 nm, 且实现了偏振无关.

3.3 性能分析

对于解复用器, 最重要的性能是插入损耗 (Insertion Loss, IL) 和串扰 (Crosstalk, CT), 其定义如 (7) 式和 (8) 式所示:

$$\text{IL(dB)} = -10 \lg(P_d/P_{\text{in}}), \quad (7)$$

$$\text{CT(dB)} = 10 \lg(P_u/P_d), \quad (8)$$

其中, P_{in} 是输入波导中的功率, P_d 和 P_u 分别是目标输出波导和非目标输出波导中的输出功率 (例如, 对于 1310 nm 波长, P_d 和 P_u 分别是 Port3 和 Port2 的输出功率). 本文设计的偏振无关 1×2 DC 解复用器的各性能参数如表 3 所示, IL 低至 0.1 dB, 输出波导间的 CT 低至 -26.23 dB.

实际上, 光源并不是单色光, 因而需要考虑光波长变化对器件性能的影响. 对于解复用器而言, 通常用 3 dB 带宽进行衡量. 图 7 给出了归一化输出功率随波长的变化关系, 由图 7(a) 可见, 当入射光的波长变化范围为 1140—1430 nm 时, Port3 的输出光功率仍保持在输入光功率的一半以上, 也即对于 1310 nm 波段, 3 dB 带宽可以达到 290 nm. 同理, 由图 7(b) 可得, 对于 1550 nm 波段, 3 dB 带宽也可以达到 200 nm. 本文设计的 DC 型解复用器表现出了优越的高带宽性能, 远远高于其他文献 [11—12, 14—15].

此外, 我们还将本文所设计器件与其他 DC 型偏振无关解复用器的性能参数比较, 如表 4 所示. 其中 $\bar{\text{IL}}$ 为各波长不同偏振态入射时的 IL 的平均值, $\bar{\text{CT}}$ 为各波长不同偏振态入射时的 CT 的平均值. 通过对比可见: 本文所设计的 DC 型解复用器不仅实现了偏振无关, 且尺寸最小, 具有结构紧凑、损耗低等优点.

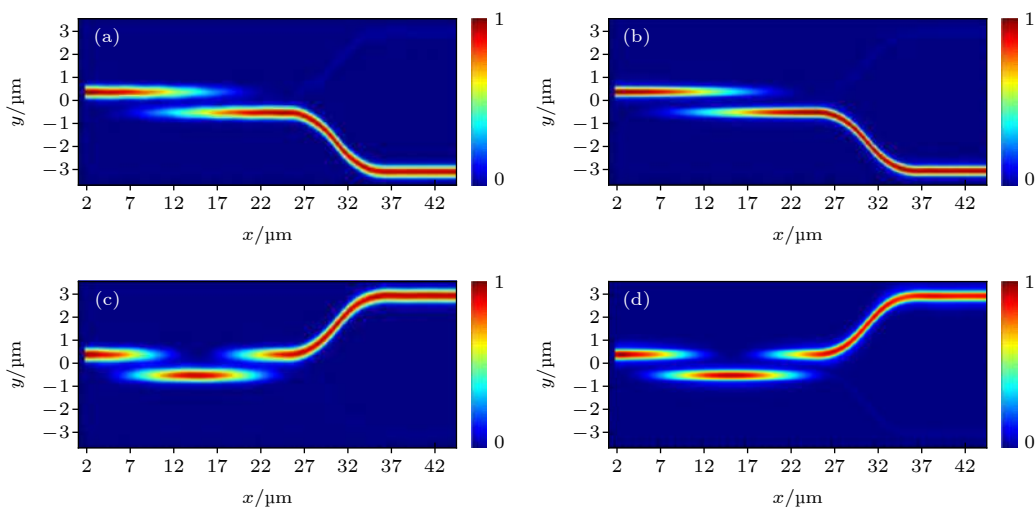


图 6 偏振无关 1×2 DC 解复用器件的光场分布图 (a) 1310 nm, TE 波; (b) 1310 nm, TM 波; (c) 1550 nm, TE 波; (d) 1550 nm, TM 波
Fig. 6. Field distributions of the DC demultiplexer: (a) Quasi-TE mode, at 1310 nm; (b) quasi-TM mode, at 1310 nm; (c) quasi-TE mode, at 1550 nm; (d) quasi-TM mode, at 1550 nm.

表 3 偏振无关 1×2 DC 解复用器的性能参数
Table 3. Performances of the polarization-insensitive DC demultiplexer.

性能参数	IL/dB	CT/dB
1310 nm, TE	0.1	-20.92
1310 nm, TM	0.16	-21.62
1550 nm, TE	0.32	-26.23
1550 nm, TM	0.76	-24.2

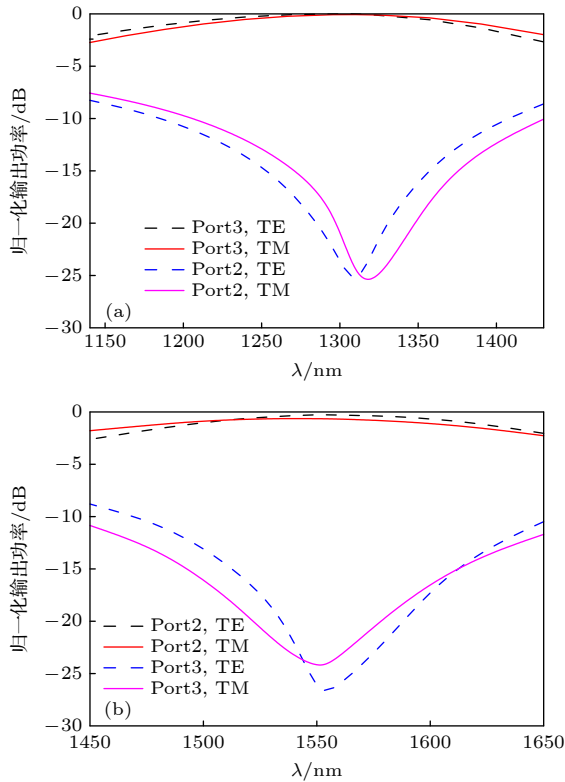


图 7 Port 2 和 Port 3 两端口归一化输出光功率随波段的变化 (a) 1310 nm 波段; (b) 1550 nm 波段

Fig. 7. Output powers (normalized to the input power) from Ports 2 and 3 as the wavelength varies: (a) 1310 nm band; (b) 1550 nm band.

表 4 DC 型偏振无关解复用器的性能参数比较
Table 4. Comparison of performances of the polarization-insensitive DC demultiplexer.

器件类型	$(L_{DC}/\text{面积})/(\mu\text{m}/\mu\text{m}^2)$	$\overline{\text{IL}}/\text{dB}$	$\overline{\text{CT}}/\text{dB}$
本文	23	0.335	-23.24
文献[14]	40×25 (弯曲波导结构)	0.33	-22.1
文献[15]	48.2	0.225	-21.25

4 结 论

本文设计了一种基于 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ 夹层结构的偏振无关 1×2 DC 解复用器, 用于分离

1310 nm 和 1550 nm 两个波长. 首先讨论了如何利用 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ 夹层结构实现偏振无关, 分析了不同结构参数时, L_c 随 g_1 的变化关系, 最终得出结论: 通过合理选择 g_1 , 可以使得 $L_c(\lambda, \text{TE}) \approx L_c(\lambda, \text{TM})$, 从而实现器件的偏振无关. 然后对如何实现波长分离功能进行了讨论, 给出了不同结构参数时, 器件的尺寸及透过率指标的对比, 确定了当参数取 $L_{DC} = 23 \mu\text{m}$, $W_0 = 0.4 \mu\text{m}$, $W_1 = 0.8 \mu\text{m}$, $g_1 = 0.08 \mu\text{m}$, $n(\text{SiN}_x) = 2.7$ 时, 两个波长分别从不同输出波导端口输出, 器件同时实现了偏振无关和解复用功能. 最后对器件的性能进行了分析, 基于 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 平台使器件表现出了高带宽的优越性能, 且有效的减小了器件的尺寸. 该解复用器的 DC 波导的长度仅为 $23 \mu\text{m}$, 在 1310 nm(1550 nm) 工作波长下, TE 模与 TM 模的 IL 分别为 0.1 dB (0.32 dB) 与 0.16 dB(0.76 dB), 输出波导间的 CT 分别为 -20.92 dB(-21.62 dB) 与 -26.23 dB(-24.2 dB). 器件结构紧凑, 性能优越, 在新型集成光子系统中具有潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Walker R G, Urquhart J, Bennion I, Carter A C 1990 *IEEE P-Optoelectron* **137** 33
- [2] Zhang S, Ji W, Yin R, Li X, Gong Z, Lv L 2018 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** 107
- [3] Shih T T, Wu Y D, Lee J J 2009 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **21** 18
- [4] Hibino Y 2002 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **8** 1090
- [5] Song J H, Lim J H, Kim R K, ET AL 2005 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17** 2607
- [6] Song J H, Kim K Y, Cho J, ET AL 2005 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **17** 1668
- [7] Liu Y D, Li Z H, Yu J Z 2019 *Physics* **48** 82 (in Chinese) [刘耀东, 李志华, 余金中 2019 *物理* **48** 82]
- [8] Roeloffzen C G H, Hoekman M, Klein E J, ET AL 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 121
- [9] Sacher W D, Huang Y, Liang D, ET AL 2014 *Optical Fiber Communications Conference & Exhibition. IEEE*, San Francisco, CA, USA, March 9–13, 2014 pTh1A.3
- [10] Gupta R K, Chandran S, Krishna B 2018 *3rd International Conference on Microwave and Photonics*, Dhanbad, India, February 9–11, 2018 p1
- [11] Chen J Y, Shi Y C 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 5260
- [12] Xu H N, Shi Y C 2017 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **29** 1265
- [13] Shi Y C, Anand S, He S L 2008 *Asia Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference*, Shanghai, China, October 30–November 2, 2018 p1
- [14] Chen J Y, Liu L, Shi Y C 2017 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **29** 1975
- [15] Shi Y C, Anand S, He S L 2009 *J. Lightwave Technol.* **27** 1443
- [16] Hardy A, Streifer W 1985 *J. Lightwave Technol.* **LT-3** 1135

- [17] Chen Y, Joines W T 2003 *Opt. Commun.* **228** 319
 [18] Fujisawa T, Koshida M 2006 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18** 1246
 [19] Chiang K S, Liu Q 2011 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **23** 1277
 [20] Wang J L, Chen Z Y, Chen H M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 054206 (in Chinese) [汪静丽, 陈子玉, 陈鹤鸣 2020 物理学报 **69** 054206]
 [21] Lee C C, Chen H L, Hsu J C, Tien C L 1999 *Appl. Opt.* **38** 2078
 [22] Zou X Y, Yuan J S, Jiang Y X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 148106 (in Chinese) [邹祥云, 苑进社, 蒋一祥 2012 物理学报 **61** 148106]
 [23] Wang Q, He S L 2003 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **5** 449

Design of polarization-insensitive 1×2 directional coupler demultiplexer based on sandwiched structure^{*}

Wang Jing-Li^{1)†} Chen Zi-Yu¹⁾ Chen He-Ming²⁾

1) (College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

2) (Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 13 May 2020; revised manuscript received 13 May 2020)

Abstract

An ultra-compact 1×2 demultiplexer based on directional coupler (DC) waveguide is proposed to separate the 1310 nm wavelength from 1550 nm wavelength, in which a new $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiN}_x/\text{Si}_3\text{N}_4$ sandwiched structure is used to realize polarization insensitivity. Firstly, the new sandwiched structure is designed to be polarization-independent. The coupling lengths of two orthogonal polarization modes at the same wavelength versus the gap between two parallel SiN_x waveguides g_1 are calculated with several groups of structure parameters of the demultiplexer. The result shows that the coupling lengths for the two orthogonal polarization modes at the same wavelength can be identical by choosing the proper g_1 . Then, how to realize the function of wavelength separation is studied. When one wavelength propagates at even multiple of coupling length and the other wavelength propagates at odd multiple of coupling length, and vice versa, the two working wavelengths will output from different output ports, thereby the two wavelengths are successfully separated. Under the premise of satisfying such conditions, a comparison of size and performance among the devices with different groups of structure parameters is given to find the best one. The demultiplexer based on $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ platform has a compact structure, easy integration and good tolerance. Three-dimensional(3D) finite-difference time-domain method is used for simulation, and the results show that the length of the DC waveguide is only 23 μm ; the insertion loss and crosstalk are as low as 0.1 dB and -26.23 dB respectively; a broad 3-dB bandwidth of 200 nm is achieved. To demonstrate the transmission characteristics of the demultiplexer, the evolution of the excited fundamental mode in the demultiplexer is also given. The novel demultiplexer is polarization-independent and can work at 1310 nm and 1550 nm wavelengths simultaneously. It has a potential application value in future integrated optical circuits.

Keywords: directional coupler, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ platform, polarization-insensitive, sandwiched structure

PACS: 42.79.-e, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.70.20200721

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61571237), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20151509), NUPTSF of China (Grant No. NY217047), and the Horizontal Program of China (Grant No. 2017 external 65).

[†] Corresponding author. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn