

## 1967~2033 nm 波段硅基可调谐外腔半导体激光器设计与仿真

万浩然<sup>1</sup>, 杨禹霖<sup>1</sup>, 乔忠良<sup>1\*</sup>, 李翔<sup>2,3</sup>, Jia Xu Brian Sia<sup>2,3</sup>, 余文军<sup>1</sup>, 翁登群<sup>1</sup>, 李再金<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>,  
陈浩<sup>1</sup>, 赵志斌<sup>1</sup>, 薄报学<sup>5</sup>, 高欣<sup>5</sup>, 曲轶<sup>1</sup>, 刘重阳<sup>2,3</sup>, 汪宏<sup>2</sup>, 张宇<sup>4</sup>, 牛智川<sup>4</sup>

<sup>1</sup>海南师范大学物理与电子工程学院海南省激光技术与光电子功能材料重点实验室,

半导体激光海南省国际联合研究中心, 海南 海口 571158;

<sup>2</sup>新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798;

<sup>3</sup>新加坡南洋理工大学淡马锡实验室, 新加坡 637553;

<sup>4</sup>中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083;

<sup>5</sup>长春理工大学大功率半导体激光器国家重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 2 μm 波长附近可调谐半导体激光器在分子光谱学和光通信领域中有广阔的应用前景。基于绝缘体上硅(SOI)平台,对 2 μm 波长附近可调谐半导体激光器的外腔部分进行了设计优化。分析了不同尺寸光波导的模式损耗特性、单个微环谐振腔受总线波导耦合间距的作用以及总线波导光反馈终端对外腔半导体激光器性能的影响。并提出了一种具有高工艺兼容度的多模环形光波导光反馈结构。所设计的可调谐半导体激光器硅基外腔可通过环形波导上的镍铬合金微加热器进行 0.1 nm/K 的高精度调谐,对单个微加热器施加 3.2 V 电压时,调谐范围可达 66 nm (1967~2033 nm)。

**关键词** 硅光集成; 可调谐外腔半导体激光器; 环形谐振腔; 光波导终端

**中图分类号** TN256; TN252; TN248

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL231435

## 1 引言

近年来,2 μm 波段可调谐激光器受到了广泛关注。一方面是因为硫化氢(H<sub>2</sub>S)、溴化氢(HBr)和二氧化碳(CO<sub>2</sub>)等痕量气体在 2 μm 波长附近具有强吸收谱线,使得 2 μm 波长附近可调谐半导体激光器成为气体探测领域的重要光源<sup>[1-3]</sup>;另一方面,随着 2 μm 波段光传输等光通信技术的突破,2 μm 波长可调谐激光器有望替代传统的 1.55 μm 波长光源成为未来更大数据容量光通信技术中的核心组件<sup>[4-6]</sup>。现有的可调谐外腔半导体激光器(ECDL)研究方案主要包括:基于衍射光栅型 ECDL<sup>[7-10]</sup>(Littrow 结构和 Littman 结构),基于光纤光栅型 ECDL 结构<sup>[11-12]</sup>,以及波导型 ECDL 结构<sup>[13-16]</sup>。得益于硅光子技术的发展,相较于体积较大的衍射光栅型 ECDL 以及仅有数纳米调谐范围的光纤光栅型 ECDL,基于硅光子

芯片外腔与 III-V 族增益芯片单片集成的波导型 ECDL<sup>[17]</sup>,在实现窄线宽的同时兼具宽调谐范围的优良特性,已成为外腔可调谐半导体激光器研究领域的热点。

到目前为止,对硅光子芯片外腔与 III-V 族增益芯片单片集成的波导型 ECDL 的研究,主要集中在 1.55 μm 波长附近<sup>[18-21]</sup>。对 2 μm 波长附近波导型 ECDL 的研究<sup>[22-23]</sup>仍然较少。2016 年,来自根特大学的研究人员通过 GaSb 基增益芯片与绝缘体上硅(SOI)基硅光子芯片外腔实现了 2 μm 波长可调谐激光器,并且首次研究了微环与总线波导耦合间距( $G_{\text{gapmrr}}$ )对外腔可调谐激光器性能的影响<sup>[24]</sup>。之后,2020 年,南洋理工大学的 Sia 等<sup>[25]</sup>对  $G_{\text{gapmrr}}$  的影响进行了理论阐述和实验论证,指出  $G_{\text{gapmrr}}$  对激光器性能存在多方面影响,须根据目标应用需求优化  $G_{\text{gapmrr}}$ 。然而,无论是空间信号传输还是气体探测领域,都会对

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2024-01-08; 录用日期: 2024-01-16; 网络首发日期: 2024-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(62274048, 62174046, 61964007, 62064004, 61864002)、海南省重点研发项目(ZDYF2020036, ZDYF2020020, ZDYF2020217)、海南省自然科学基金(622RC671, 120MS031, 2019RC190)、海南省重大科技计划项目(ZD-KJ2019005)、海南省院士创新平台专项(YSPTZX202034, YSPTZX202127)、海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020-24, Hnjg2021ZD-22, Hnjg2022ZD-18)

通信作者: \*qzhl060910@hainnu.edu.cn

外腔可调谐激光器的输出功率、边模抑制比(SMSR)以及稳定性有较高要求。另外,以上对 $G_{\text{gapmrr}}$ 的研究是在默认两个微环谐振器与总线波导耦合距离相等的情况下进行的,并未对单个微环谐振器的耦合距离做分析。因此,本文在上述研究基础上,进一步对 $2\ \mu\text{m}$ 波长附近可调谐半导体激光器的外腔部分进行结构设计优化,也对不同尺寸光波导的模式损耗特性做了仿真分析。特别研究了单个微环谐振器 $G_{\text{gapmrr}}$ 对游标滤波器的性能影响。此外,讨论了总线波导光反馈终端杂散光对游标滤波器传输谱线的干扰,并提出了一种高工艺兼容度的多模环形光波导反馈终结结构。最后,通过模拟展示了所设计硅基可调谐激光器外腔良好的调谐性能。

## 2 可调谐激光器外腔设计优化

### 2.1 可调谐激光器外腔结构

可调谐硅光子芯片外腔设计基于 $220\ \text{nm}$ 的SOI平台,如图1所示。游标腔部分主要由两个微环谐振器(MRR)和一个Sagnac环形反射镜(SLR)构成。微环谐振器的半径 $R_{\text{mrr1}}=21.95\ \mu\text{m}$ 、 $R_{\text{mrr2}}=19.51\ \mu\text{m}$ , $G_{\text{gapmrr}}=220\ \text{nm}$ ,波导横截面为 $600\ \text{nm}\times 220\ \text{nm}$ 。在微环谐振器波导上方 $1\ \mu\text{m}$ 处设有镍铬合金微加热器,用以实现对激光器输出波长的热调谐;硅光子芯片外腔利用模斑转换器(SSC)与增益芯片端面耦合。此外,为防止波导端面的反射降低激光器的光谱稳定性,在总线波导的末端设有光波导反馈终结结构,用以吸收杂散光。

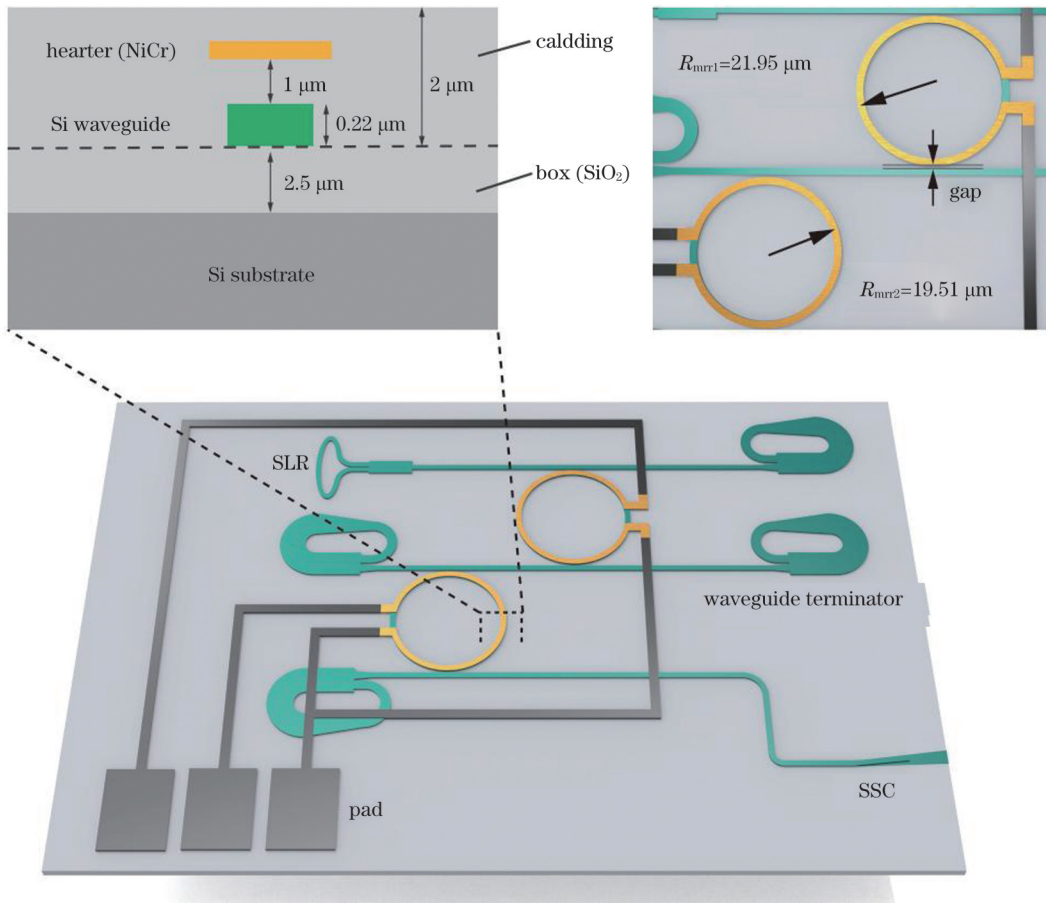


图1 设计的可调谐激光器外腔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the external cavity structure of the designed tunable laser

### 2.2 单模波导设计及模式损耗特性分析

为提高ECDL的输出光功率,一方面可通过更高效的耦合方式来提高硅光子芯片外腔与III-V族增益芯片的耦合效率,常见的方式分别有腔面镀膜<sup>[26]</sup>、模斑转换器<sup>[27]</sup>和光子引线键合<sup>[28]</sup>等,或者上述工艺和结构方式的组合;另一方面则是研究损耗更低的硅光子芯片外腔,例如通过改进工艺,降低波导侧壁粗糙度或者优化波导的垂直度。除了工艺部分的改进外,设计低

损耗的单模波导外腔,同样能达到降低光在芯片内的传输损耗的目的。光模式要在Si波导中传播,其有效折射率 $n_{\text{eff}}$ 必须要大于包层与埋氧层的 $\text{SiO}_2$ 折射率,小于Si波导的折射率,即 $1.44 < n_{\text{eff}} < 3.44$ 。此外,有效折射率越大的波导模式,被波导束缚的程度越大,越不容易泄漏到包层和埋氧层中。因此,需要分析Si波导中模式有效折射率与波导宽度的关系,以便确定最佳单模波导区间。使用Lumerical mode solution中的

Eigenmode 求解器, 对不同宽度波导的有效折射率进行计算, 图 2(a)~(c) 分别是波长为 1.95、2.0、2.05  $\mu\text{m}$  的计算结果。

对于波长 1.95  $\mu\text{m}$  的计算结果, 只有虚线上方的模式 ( $n_{\text{eff}} > 1.44$ ) 能在波导中传播。当波导宽度在 0.22~0.63  $\mu\text{m}$  范围内时, 波导中仅支持  $\text{TE}_{00}$  模式和  $\text{TM}_{00}$  模式。对于更宽的波导, 支持更高阶的模式传播, 并且在 0.78  $\mu\text{m}$  处, 存在模式交叉。即波导宽度小于 0.78  $\mu\text{m}$  时,  $\text{TM}_{00}$  模式是波导中的第二支持模式, 波

导宽度大于 0.78  $\mu\text{m}$  后,  $\text{TE}_{01}$  模式将成为第二支持模式,  $\text{TM}_{00}$  模式则降为第三支持模式, 后续在 1.3  $\mu\text{m}$  处存在同样模式交叉现象。本文将 0.22~0.63  $\mu\text{m}$  的波导宽度范围称为(准)单模区间, 用灰色区域标出。对比图 2(a)~(c) 中(准)单模区间范围可知, 波长越大, 波导中支持准单模传输的宽度范围越小。为了满足在 1.95~2.05  $\mu\text{m}$  波长范围内的准单模传输, 减少波导中高阶模式竞争损耗, Si 波导的宽度应在 0.28~0.63  $\mu\text{m}$  范围内选择。

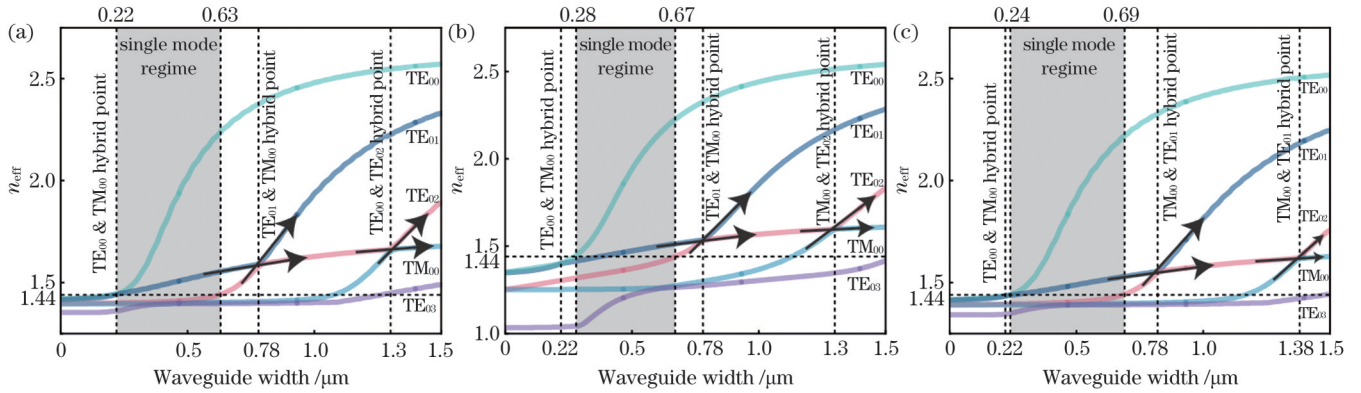


图 2 220 nm 厚度硅波导模式有效折射率与波导宽度关系。(a)  $\lambda=1.95 \mu\text{m}$ ; (b)  $\lambda=2 \mu\text{m}$ ; (c)  $\lambda=2.05 \mu\text{m}$

Fig. 2 Relationship between the effective refractive index of 220 nm thick silicon waveguide mode and waveguide width. (a)  $\lambda=1.95 \mu\text{m}$ ; (b)  $\lambda=2 \mu\text{m}$ ; (c)  $\lambda=2.05 \mu\text{m}$

需要注意的是, 在(准)单模区间内, 波导支持的模式并非纯 TE 模式, 而是用模式极化分数来表示  $\text{TE}_{00}$  模式与  $\text{TM}_{00}$  模式所占的比值, 并且随着波导宽度增加,  $\text{TE}_{00}$  模式与  $\text{TM}_{00}$  模式的有效折射率差值增大, Si 波导对  $\text{TE}_{00}$  模式的束缚能力会比对  $\text{TM}_{00}$  模式更强。因此, 本文进一步研究了不同厚度 Si 波导的单模区间范围以及  $\text{TE}_{00}$  模式、 $\text{TM}_{00}$  模式的有效折射率差与 Si 厚度关系, 结果如图 3 所示。

随着波导厚度的增加,  $\text{TE}_{00}$  模式与  $\text{TM}_{00}$  模式的有

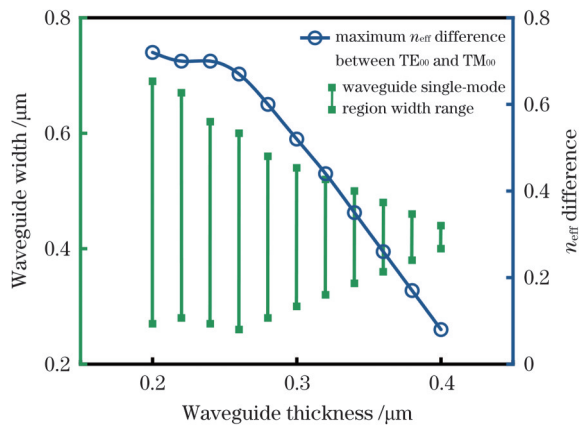


图 3 单模区间波导宽度范围、 $\text{TE}_{00}$  和  $\text{TM}_{00}$  模式的最大折射率差与波导厚度关系

Fig. 3 Relationship between width range of single-mode interval waveguide, the maximum index difference between  $\text{TE}_{00}$  and  $\text{TM}_{00}$  modes, and waveguide thickness

效折射率都在增大, 但两个模式间的最大有效折射率差在减小, 从而影响单模区间的  $\text{TE}_{00}$  模式传输, 其不再是真正意义上的单模传输。当波导厚度小于 0.24  $\mu\text{m}$  时,  $\text{TE}_{00}$  与  $\text{TM}_{00}$  之间的最大有效折射率差随波导厚度变化趋于平稳, 接近最大值。

为确保 Si 波导中的  $\text{TE}_{00}$  单模传播, 对直波导和弯曲波导中 2  $\mu\text{m}$  波长的  $\text{TE}_{00}$  模式和  $\text{TM}_{00}$  模式的损耗特性进行了研究, 直波导结果如图 4 所示。 $\text{TM}_{00}$  模式和  $\text{TE}_{00}$  模式的损耗随着波导宽度的增加而减小, 并且

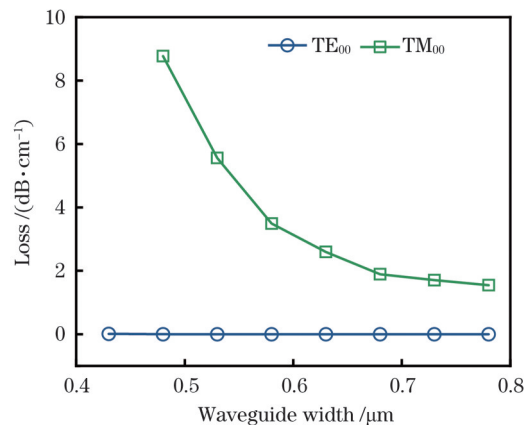


图 4  $\text{TE}_{00}$  和  $\text{TM}_{00}$  模式损耗与直波导宽度关系 (Si 波导厚度为 220 nm,  $\lambda=2 \mu\text{m}$ )

Fig. 4 Relationship between  $\text{TE}_{00}$  and  $\text{TM}_{00}$  modes losses and straight waveguide width (Si thickness of 220 nm,  $\lambda=2 \mu\text{m}$ )



TM<sub>00</sub>的模式损耗始终远大于TE<sub>00</sub>的模式损耗。这是因为TE<sub>00</sub>模式在 $x$ 方向的电场基本分布在波导里面,损耗很小,而TM<sub>00</sub>模式电场都分布在波导外面,导致损耗很大。当波导宽度大于0.45  $\mu\text{m}$ 时,TE<sub>00</sub>模式损耗基本接近0 dB/m(仿真中未考虑工艺造成的侧壁粗糙度,只计算波导结构带来的模式损耗)。当波导宽度为0.7  $\mu\text{m}$ 时,TM<sub>00</sub>模式损耗仍有2 dB/cm。因此,可以优化波导宽度,使TM<sub>00</sub>模式在直波导传输过程中因模式损耗而消失,而损耗小的TE<sub>00</sub>模式则可以实现低损耗单模传输。

对于弯曲波导,设定波导厚度和宽度为0.22  $\mu\text{m}$ 和0.6  $\mu\text{m}$ ,计算其2  $\mu\text{m}$ 波长TE<sub>00</sub>和TM<sub>00</sub>模式损耗随波导弯曲半径的变化,结果如图5所示。随着弯曲半径的增加,TE<sub>00</sub>模式和TM<sub>00</sub>模式的损耗都在降低,TM<sub>00</sub>模式损耗远大于TE<sub>00</sub>模式损耗。在弯曲半径为30  $\mu\text{m}$ 处TM<sub>00</sub>模式损耗高达30 dB/cm,而TE<sub>00</sub>的模式损耗在弯曲半径大于5  $\mu\text{m}$ 后,逐渐趋近于0 dB/cm。因此,要实现TE<sub>00</sub>单模传输且低损耗,Si波导弯曲半径应大于5  $\mu\text{m}$ 。

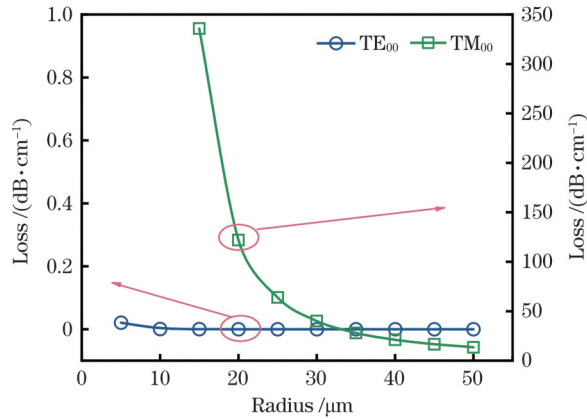


图5 TE<sub>00</sub>、TM<sub>00</sub>模式损耗与弯曲半径关系

Fig. 5 Relationship between TE<sub>00</sub> and TM<sub>00</sub> modes losses and bending radius

### 2.3 游标滤波器设计

单个微环谐振器的自由光谱范围(FSR)表示为

$$R_{\text{FSR}} = \frac{\lambda^2}{n_g L_{\text{MRR}}}, \quad (1)$$

式中: $n_g$ 是波导模式的群折射率; $L_{\text{MRR}}$ 是微环谐振器的腔长; $\lambda$ 是微环谐振器的工作波长。为了让微加热器调谐范围能达到单个微环的FSR,需要 $2\pi$ 相移。使用Lumerical heat求解器进行计算,对镍铬合金微加热器施加偏置电压为3 V,中心波导的温度为372 K,由于Si的热光系数为 $1.844 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,波导模式的有效折射率约为2.16。因此,波导中 $2\pi$ 相移所需的长度约为138  $\mu\text{m}$ ,对应的单个微环半径 $R_{\text{mrr1}}=21.95 \mu\text{m}$ 。接着,对该弯曲半径波导的群折射率进行计算,并将结果代入式(1),可得单个微环的FSR约为7.2 nm,而半导体光放大器(SOA)的3 dB带宽可达数十纳米,远大于

此。因此,为了实现单纵模工作,需要使用两个半径有轻微不同的微环谐振器构成游标滤波器,以增大FSR,游标滤波器的FSR表示为

$$R_{\text{FSRvernier}} = \left| \frac{R_{\text{FSR1}} \times R_{\text{FSR2}}}{R_{\text{FSR1}} - R_{\text{FSR2}}} \right|. \quad (2)$$

相较于单个微环的 $R_{\text{FSR1}}$ ,游标滤波器的FSR扩大了 $M$ 倍( $M = \left| \frac{R_{\text{FSR2}}}{R_{\text{FSR1}} - R_{\text{FSR2}}} \right|$ ),同时为了保证良好的单纵模特性, $M$ 必须是整数<sup>[29]</sup>。此处取 $M=9$ ,第二个微环谐振器的FSR为8.13 nm,对应的微环谐振器半径 $R_{\text{mrr2}}=19.51 \mu\text{m}$ 。图6是仿真得到的MRR<sub>1</sub>、MRR<sub>2</sub>和游标滤波器的传输谱线。其中:游标滤波器的FSR可达66 nm;游标透射效率(VTE)表示游标滤波器峰值波长下的插入损耗;被动边模抑制比(SMSR)与ECDL的纵模选择特性相关。

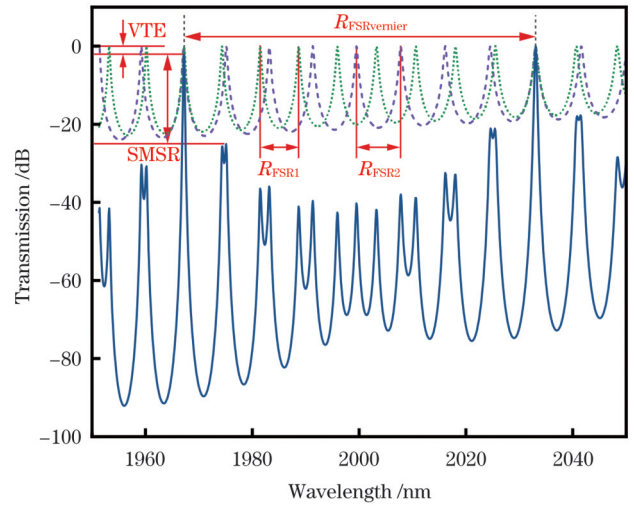


图6 MRR<sub>1</sub>、MRR<sub>2</sub>和游标滤波器的功率传输光谱

Fig. 6 Power transmission spectra of MRR<sub>1</sub>, MRR<sub>2</sub>, and the vernier filter

MRR<sub>1</sub>和MRR<sub>2</sub>与总线波导之间的耦合系数 $k$ 是影响游标滤波器性能的关键因素,而 $k$ 值的大小由MRR和总线波导之间的耦合间隙 $G_{\text{gapmrr}}$ 所决定。图7是通过仿真计算得到的1.95~2.05  $\mu\text{m}$ 波长范围内不同 $G_{\text{gapmrr}}$ 所对应的耦合系数 $k$ 。 $G_{\text{gapmrr1}}$ 与 $G_{\text{gapmrr2}}$ 分别是MRR<sub>1</sub>和MRR<sub>2</sub>与总线波导之间的耦合距离。由于两个微环的半径略微不同,所以MRR<sub>1</sub>和MRR<sub>2</sub>与总线波导之间的耦合系数 $k$ 会存在差值,并且这一差值会随着耦合距离的减小而增大。原因是当 $G_{\text{gapmrr}}$ 减小到一定程度后,不同曲率半径对耦合长度的影响程度被放大,具有较大半径的MRR<sub>1</sub>与总线波导的耦合长度更长,耦合系数会明显大于MRR<sub>2</sub>。当耦合距离大于200 nm时,耦合系数 $k$ 的差值可以忽略, $G_{\text{gapmrr1}}$ 与 $G_{\text{gapmrr2}}$ 可以取相同的值。而在同一耦合距离下,耦合系数 $k$ 呈现出波长相关性,波长越大, $k$ 值越大。并且耦合系数 $k$ 以及与波长相关性会随着 $G_{\text{gapmrr}}$ 的增大而减小,即 $G_{\text{gapmrr}}$ 越大,耦合系数

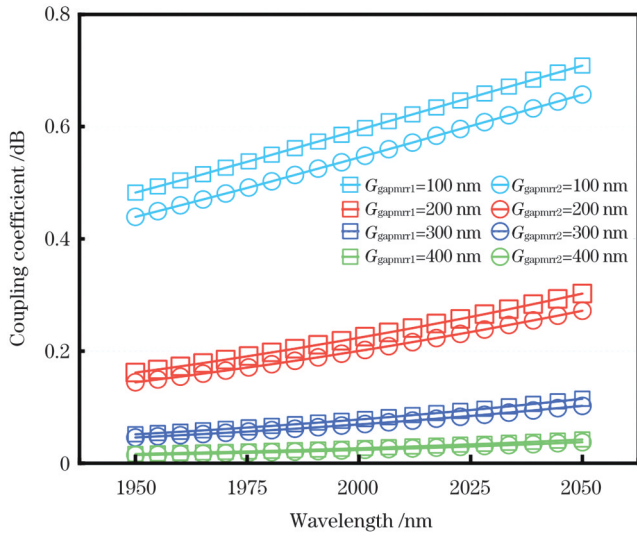


图 7 耦合系数与  $G_{\text{gapmrr}1}$ 、 $G_{\text{gapmrr}2}$  之间的关系 (波长为 1.95~2.05  $\mu\text{m}$ )

Fig. 7 Relationship between coupling coefficient and  $G_{\text{gapmrr}1}$  and  $G_{\text{gapmrr}2}$  (wavelength range from 1.95  $\mu\text{m}$  to 2.05  $\mu\text{m}$ )

$k$  的值越小, 耦合系数曲线也越平坦。由于耦合系数  $k$  的波长相关性, 游标滤波器在调谐时, 不同波长的透射光性能会有所差异, 从而影响 ECDL 的工作带宽。因此, 在游标滤波器的设计中, 需要综合考虑对耦合距离的优化。

除了 VTE 和 SMSR 外, 游标滤波器的关键性能参

数还包括半峰全宽 (FWHM) 和  $Q$  值。因此, 通过仿真进一步研究了两个微环谐振器  $G_{\text{gapmrr}}$  与上述性能参数的关系。图 8(a) 给出了游标滤波器被动边模抑制比与耦合距离的关系。可以看到, SMSR 随  $G_{\text{gapmrr}}$  增大而增加, 在  $G_{\text{gapmrr}}$  大于 250 nm 之后, 增加趋势趋于平缓。这是由于耦合系数  $k$  随着  $G_{\text{gapmrr}}$  增加而减小, 微环谐振器的有效长度随之增大。之后, 边模抑制比趋于平缓, 这是因为耦合距离过大, 光在环路中循环时的损耗较高。直接表现是游标滤波器的插入损耗随耦合距离增大, 如图 8(b) 所示。同理, 在图 8(c) 中, 观察到游标滤波器的线宽随耦合距离的增大而急剧减小, 而后趋于平缓。图 8(d) 中游标滤波器的  $Q$  值变化趋势则刚好与之相反: 在  $G_{\text{gapmrr}}$  为 100 nm 时, 耦合进出微环谐振器的光较多, 微环腔的模式选择能力下降, 因而游标滤波器的  $Q$  值较低, 对应的 FWHM 也就较大。而随着耦合距离增大, 耦合系数减小,  $Q$  值相应增大。需要注意的是, 当耦合间距大于 300 nm 后, 两个微环谐振器之间的半径差值对游标滤波器  $Q$  值和传输损耗的影响将被放大。这是由于微环谐振器的有效长度与耦合系数  $k$  的平方呈负相关<sup>[30]</sup>, 当耦合间距大于 300 nm 后, 两个微环的耦合系数差值减小, 有效长度的差值增大。因而随着耦合距离增大, 耦合系数减小, 半径更小的  $\text{MRR}_2$  与总线波导间的耦合距离  $G_{\text{gapmrr}2}$  对游标滤波器的  $Q$  值和 VTE 的影响会比  $\text{MRR}_1$  更大。在对 ECDL

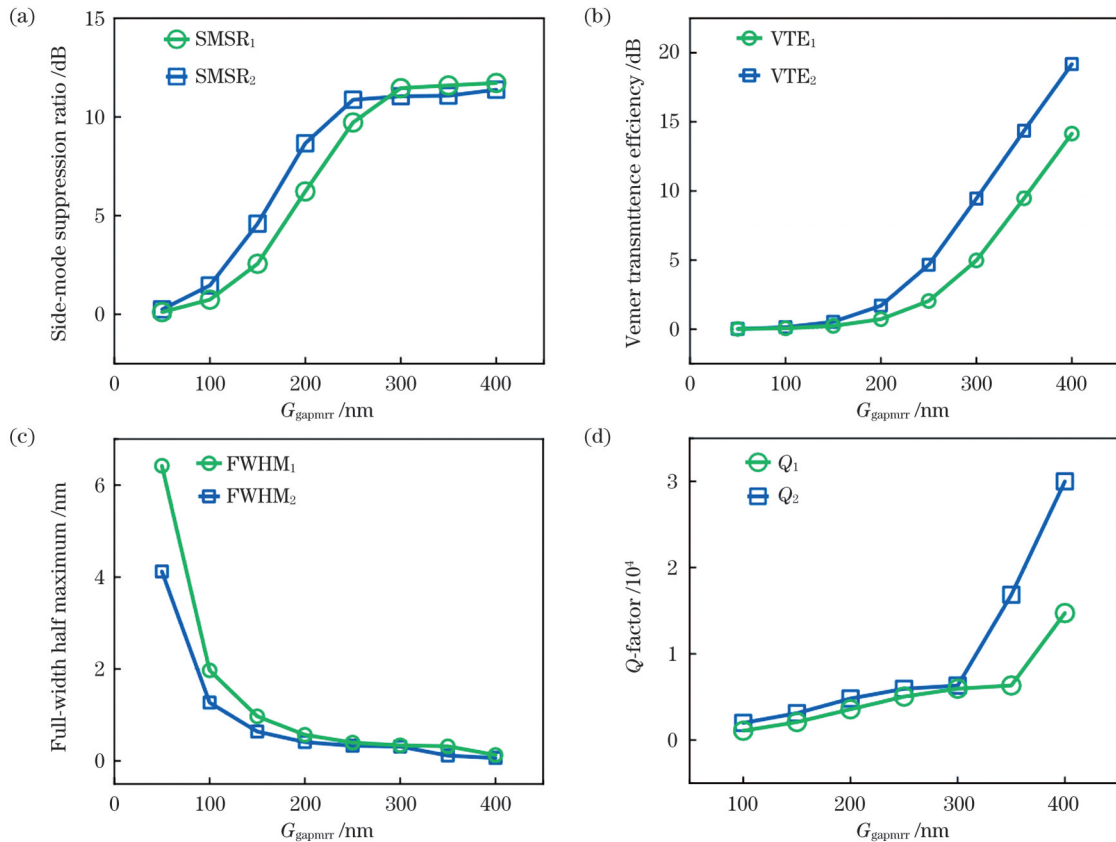


图 8  $G_{\text{gapmrr}}$  与游标滤波器参数关系。(a) SMSR; (b) VTE; (c) FWHM; (d)  $Q$  值

Fig. 8 Relationship between  $G_{\text{gapmrr}}$  and vernier filter parameters. (a) SMSR; (b) VTE; (c) FWHM; (d)  $Q$ -factor

边模抑制比需求更高的应用场景,通常会牺牲掉一部分功率,选择更大的耦合距离。此时,对不同半径的微环则需要考虑使用不同的耦合距离。当对 ECDL 输出功率和 SMSR 都有期望时,通过权衡选择适中的  $G_{\text{gapmr}}$ ,可以考虑与总线波导相同耦合距离的微环谐振器,从而降低设计与工艺的复杂度。

根据上述的研究分析,所设计的双微环谐振腔的各个参数如表 1 所示。

#### 2.4 总线波导端面反射率分析与光波导光反馈终结结构设计

通过传输矩阵法计算得到游标滤波器的透射谱,如图 9 所示,图 9(a)、(b) 分别代表总线波导终端反射率等于和大于 0 的情况。比较可知,当光传输到总线波导终端后部分反射回了游标滤波器内,游

表 1 游标滤波器参数

Table 1 Parameters of vernier filter

Parameter	Value	
Cross-section size of waveguide /nm	Width	600
	Thickness	220
Coupling region /nm	Gap	220
Radius / $\mu\text{m}$	$R_1$	21.95
	$R_2$	19.51

标滤波器的透射谱出现了细纹,并且边模抑制比也因受到扰动而减小,而 FWHM 的变化最为明显,这会使得 ECDL 的稳定性受到极大影响。通常在设计可调谐激光器外腔时,使用 Taper 型波导终端<sup>[31]</sup>、螺旋波导终端<sup>[29]</sup>或者直接使用光栅耦合器<sup>[24]</sup>将杂散光导出。

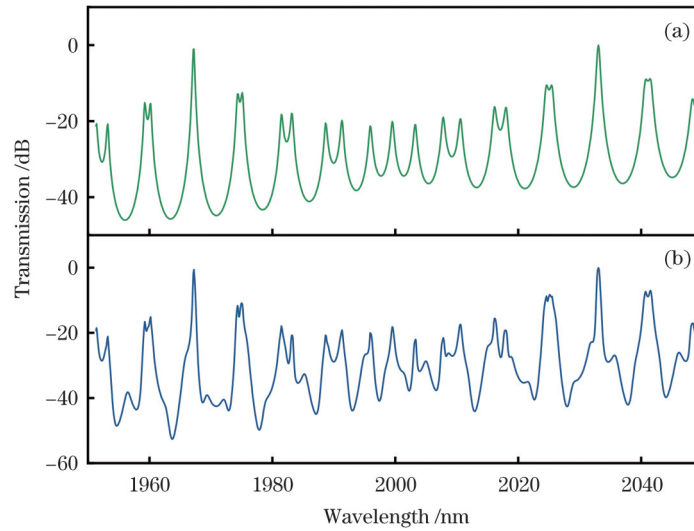


图 9 波导终端反射率对游标滤波器功率传输光谱影响。(a) 反射率等于 0; (b) 反射率大于 0

Fig. 9 Impact of waveguide terminator reflectivity on the power transmission spectrum of vernier filter. (a) Reflectivity is 0; (b) reflectivity is greater than 0

此处提出一种多模环形波导光反馈终结结构,利用多模波导弯曲损耗和散射损耗终结波导中的杂散光,其结构和光场分布分别如图 10(a)、(b) 所示。当光从宽度为  $0.6 \mu\text{m}$  的单模波导直接进入宽度为  $6 \mu\text{m}$  的多模波导区域时,因为波导模式不匹配会存在反射损耗,因此加入了  $20 \mu\text{m}$  长的锥形波导过渡区,从而避免光反射回输入波导中。在多模波导区域内,当光从直波导进入弯曲波导时,由于曲率半径发生突变,会存在一定的散射损耗;当光在弯曲波导中传播时,靠近波导外侧的电磁波相速度更大,波导中的模式会有不同程度辐射(弯曲损耗)。从之前的仿真中可知:波导弯曲半径小于  $5 \mu\text{m}$  时,基模有较高的传输损耗,且相同条件下高阶模式光传输损耗远大于基模传输损耗,因而会有较多光从弯曲波导外侧辐射出去,如图 10(b) 所示;之后,光进入波导宽度较小的环形区域,波导中大部分高阶模式的光传输不再受支持,在该过程中大部分光会沿着波导侧壁散射,剩余光维持单向传播重新回到多模波

导区,进入新一轮环程。仿真得到单模波导中的反射光功率为  $10^{-12} \text{W}$  量级,反射率可忽略不计。另外,所设计的多模环形波导光反馈终结结构特征尺寸较大,仅需一次刻蚀,具有结构简单、工艺宽容度高的优势。

#### 2.5 波长调谐

游标滤波器的波长调谐是通过微环顶部的镍铬合金微加热器实现的,热光效应改变了波导的有效折射率,从而使相位发生改变。在 SOI 波导中, Si 和  $\text{SiO}_2$  材料的热光系数分别为  $1.84 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$  和  $1 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$ 。由此,本文分别计算了  $1.95$ 、 $2$ 、 $2.05 \mu\text{m}$  波长处波导中  $\text{TE}_{00}$  模式有效折射率随温度的变化情况,结果如图 11 所示。波长越长  $\text{TE}_{00}$  模式的有效折射率越小,并且随着温度的升高,  $\text{TE}_{00}$  模式的有效折射率变大。从而得到  $1.95$ 、 $2$ 、 $2.05 \mu\text{m}$  波长处的  $\text{TE}_{00}$  模式热光系数分别为  $1.87 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 、 $1.844 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 、 $1814 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ 。

镍铬合金微加热器与 Si 波导顶部有  $1 \mu\text{m}$  距离<sup>[32-33]</sup>。因此,利用 Lumerical device 对游标滤波器的



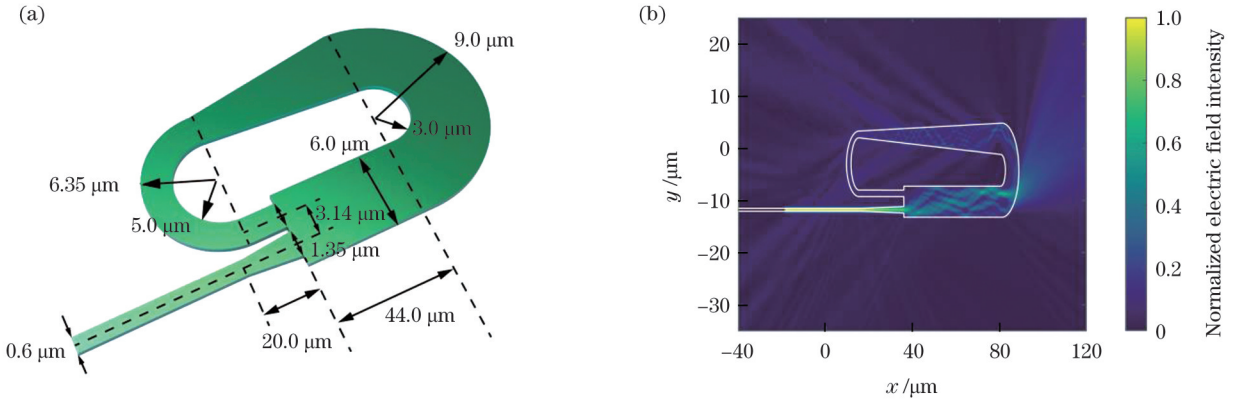


图 10 设计的多模环形波导光反馈终结结构。(a)多模环形波导光反馈终结结构示意图;(b)光场分布

Fig. 10 Design of multi-mode annular waveguide optical feedback termination structure. (a) Multi-mode annular waveguide optical feedback termination structure; (b) light field distribution

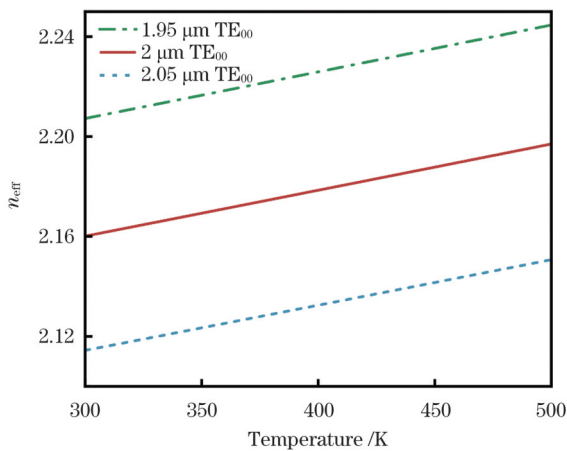


图 11 在 1.95、2、2.05 μm 波长处 TE<sub>00</sub> 模式有效折射率与温度关系  
Fig. 11 Relationship between effective refractive index and temperature at wavelengths of 1.95, 2, and 2.05 μm for the TE<sub>00</sub> mode

热传导进行了仿真,通过求解相应的热传输方程与电导传输方程,可以得到给定电压下回路中的温度分布,如图 12 所示。通过温度监视器获得波导中心平面的二维温度分布数据作为微环谐振腔波导的平均温度。此外,对波导横截面垂直方向温度分布做了验证,可以看到 Si 波导中垂直温度的变化基本可以忽略。所得微加热器偏置电压与 Si 基环形谐振腔温度之间的关系,如图 13 所示。Si 波导环形谐振腔的平均温度随偏置电压增加而升高。另外,注意到电压-温度转换效率也越来越高。这是镍铬合金微加热器的阻值随温度升高造成的。在电压为 4 V 时,环形谐振腔波导的平均温度能达到 427 K,温度变化了 127 K。图 13 中的插图分别是所施加电压为 1 V 和 3 V 情况下,环形谐振腔的温度分布情况。可以看到在 3 V 电压下,环形谐振腔的波导环中间温度最高,也就是加热器的正下方,能达到 376 K,远离中间位置温度逐渐降低。

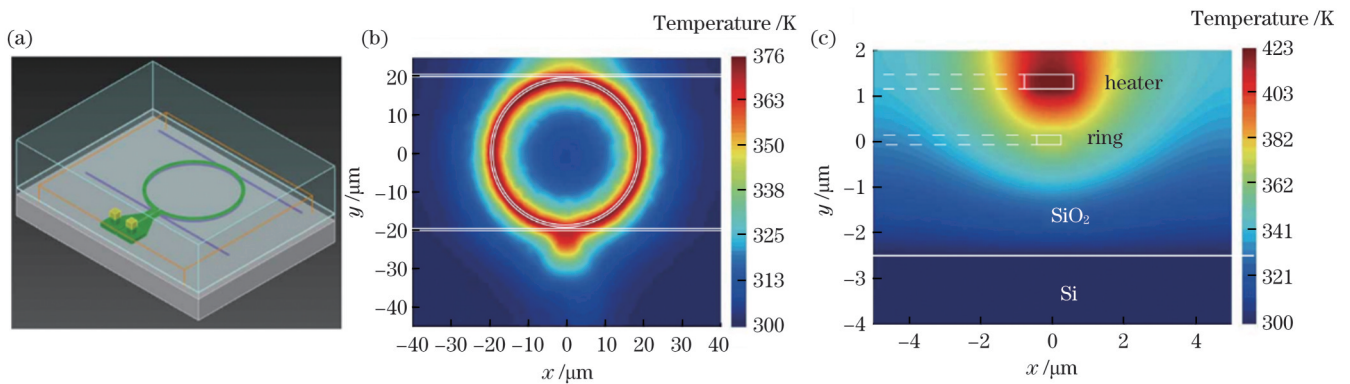


图 12 微环谐振器的热传输仿真。(a)仿真模型设置;(b)微环谐振器的温度图;(c)微环谐振器垂直分布温度截面图

Fig. 12 Heat transport simulation of micro-ring resonator. (a) Simulation model setup; (b) temperature map of micro-ring resonator; (c) cross-sectional vertical temperature distribution of micro-ring resonator

最后,通过仿真对硅基可调谐激光器外腔的宽范围调谐和精细调谐进行了研究,如图 14 和图 15 所示,由左至右,不同的透射峰依次代表了不同电致热温度。图 14 是对单个微加热器施加电压的宽范围调谐,当偏置电压为 3.2 V 时,调谐范围可达到 66 nm(1967~2033 nm),

其中透射峰对应的电致热温度范围自左往右从 300 K 升至 380 K,单个透射峰的调谐步长为 10 K。图 15 是对两个微加热器同时施加电压的精细调谐,从左往右的透射峰所对应电致热温度范围:MRR\_1 的温度由 340 K 升至 450 K, MRR\_2 温度由 300 K 升至 410 K。单个透

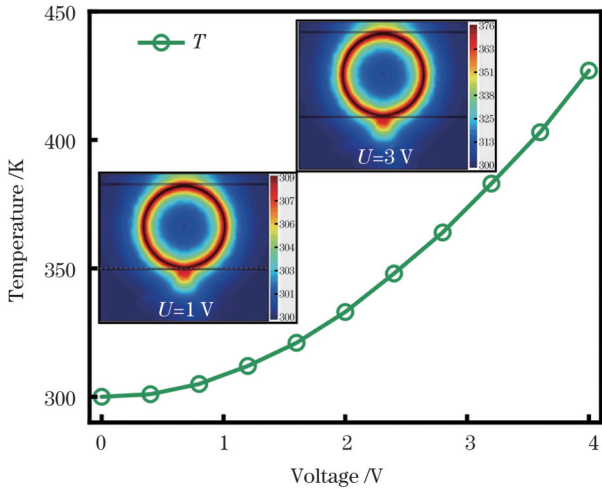


图 13 波导温度与偏置电压的关系

Fig. 13 Relationship between waveguide temperature and bias voltage

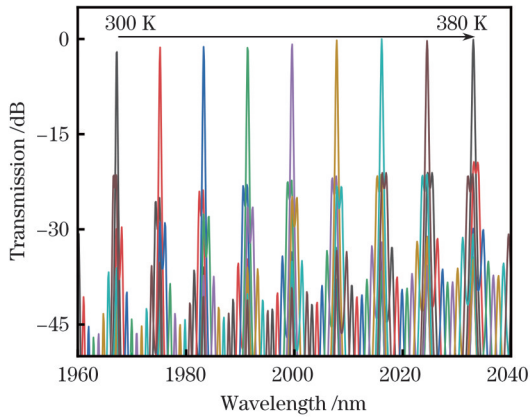


图 14 游标滤波器波长的宽范围调谐

Fig. 14 Wide tuning range of the wavelength for vernier filters

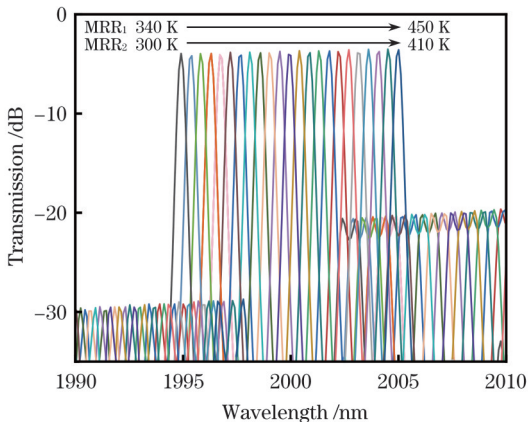


图 15 游标滤波器波长精细调谐

Fig. 15 Fine-tuning of the wavelength for vernier filters

射峰的调谐步长为 5 K, 调谐精度达到了 0.1 nm/K。

### 3 结 论

目前对 2  $\mu\text{m}$  波长附近硅基外腔可调谐激光器的研究仍然较少。本文首先基于 220 nm 的 SOI 平台, 针对不同尺寸光波导的模式损耗特性做了仿真分析, 设

计了截面尺寸为 600 nm  $\times$  220 nm 的 Si 波导, 在弯曲波导半径大于 5  $\mu\text{m}$  后, 能保证低损耗 TE<sub>00</sub> 单模传输; 其次, 分别研究了单个微环谐振器对游标滤波器的性能影响, 面对外腔可调谐激光器边模抑制比需求更高因而选择更大的耦合距离的应用场景, 对不同半径的微环则需要考虑使用不同的耦合距离, 而在面对外腔可调谐激光器输出功率和 SMSR 都有期望因而选择适中的  $G_{\text{gapmrr}}$  时, 可以考虑与总线波导相同耦合距离的双微环谐振器, 从而降低设计与工艺的复杂度; 接着, 在本次优化设计中选用的微环半径分别为  $R_{\text{mrr1}} = 21.95 \mu\text{m}$ 、 $R_{\text{mrr1}} = 19.51 \mu\text{m}$ , 采用与总线波导耦合距离相同的双微环谐振器  $G_{\text{gapmrr}} = 220 \text{ nm}$ ; 之后, 讨论了总线波导终端杂散光对游标滤波器传输谱线的影响并且提出了一种具有较高工艺兼容度的多模环形波导光反馈终结结构; 最后, 通过仿真模拟了所设计硅基可调谐激光器外腔 66 nm 的宽范围调谐以及 0.1 nm/K 的精细调谐。

### 参 考 文 献

- [1] Hodgkinson J, Tatam R P. Optical gas sensing: a review[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(1): 012004.
- [2] Hänsel A, Heck M J R. Opportunities for photonic integrated circuits in optical gas sensors[J]. Journal of Physics: Photonics, 2020, 2(1): 012002.
- [3] 杨舒涵, 乔顺达, 林殿阳, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. 中国光学, 2023, 16(1): 151-157. Yang S H, Qiao S D, Lin D Y, et al. Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Optics, 2023, 16(1): 151-157.
- [4] Shen W H, Du J B, Sun L, et al. Low-latency and high-speed hollow-core fiber optical interconnection at 2-micron waveband[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(15): 3874-3882.
- [5] Li Z, Heidt A M, Daniel J M O, et al. Thulium-doped fiber amplifier for optical communications at 2  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9289-9297.
- [6] Russell E, Kavanagh N, Shortiss K, et al. Development of thulium-doped fibre amplifiers for the 2  $\mu\text{m}$  waveband[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10683: 106832Q.
- [7] Shin D K, Henson B M, Khakimov R I, et al. Widely tunable, narrow linewidth external-cavity gain chip laser for spectroscopy between 1.0-1.1  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2016, 24(24): 27403-27414.
- [8] 马宇航, 吴昊, 李再金, 等. 基于双增益芯片合束的超宽带可调谐中红外激光器[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1114003. Ma Y H, Wu H, Li Z J, et al. An ultra-broad tunable mid-infrared laser based on beam combination of dual gain chips[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 1114003.
- [9] 马宇航, 吴昊, 李再金, 等. 4  $\mu\text{m}$  波段宽谱可调谐外腔量子级联激光器[J]. 中国激光, 2023, 50(11): 1101020. Ma Y H, Wu H, Li Z J, et al. 4  $\mu\text{m}$  waveband widely tunable external cavity quantum cascade laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(11): 1101020.
- [10] 盛立文, 葛崇琳, 曹乾涛, 等. 宽范围无跳模外腔可调谐半导体激光器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 20230374. Sheng L W, Ge C L, Cao Q T, et al. Wide-range external-cavity tunable semiconductor laser with mode-hopping free[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(8): 20230374.
- [11] Wei F, Yang F, Zhang X, et al. Subkilohertz linewidth reduction of a DFB diode laser using self-injection locking with a fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 17406-17415.
- [12] Zhang L, Wei F, Sun G W, et al. Thermal tunable narrow



- linewidth external cavity laser with thermal enhanced FBG[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(4): 385-388.
- [13] Guo Y Y, Li X H, Jin M H, et al. Hybrid integrated external cavity laser with a 172-nm tuning range[J]. APL Photonics, 2022, 7(6): 066101.
- [14] Chen C, Wei F, Han X Y, et al. Hybrid integrated Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> external cavity laser with high power and narrow linewidth[J]. Optics Express, 2023, 31(16): 26078-26091.
- [15] Tran M A, Huang D N, Guo J, et al. Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(2): 1500514.
- [16] Zhao Y, Peng Y, Yang T, et al. External cavity diode laser with kilohertz linewidth by a monolithic folded Fabry-Perot cavity optical feedback[J]. Optics Letters, 2011, 36(1): 34-36.
- [17] 刘绍殿, 肖永川, 李朋飞, 等. 微环外腔可调谐窄线宽半导体激光器特性分析[J/OL]. 激光与光电子学进展: 1-13[2024-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20231108.1141.086.html>.  
Liu S D, Xiao Y C, Li P F, et al. Characteristics analysis of tunable narrow linewidth semiconductor laser with microring external cavity[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress: 1-13[2024-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20231108.1141.086.html>.
- [18] Maier P, Chen Y, Xu Y L, et al. Sub-kHz-linewidth external-cavity laser (ECL) with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> resonator used as a tunable pump for a Kerr frequency comb[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3479-3490.
- [19] Morton P A, Xiang C, Khurgin J B, et al. Integrated coherent tunable laser (ICTL) with ultra-wideband wavelength tuning and sub-100 Hz lorentzian linewidth[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(6): 1802-1809.
- [20] van Rees A, Fan Y W, Geskus D, et al. Ring resonator enhanced mode-hop-free wavelength tuning of an integrated extended-cavity laser[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5669-5683.
- [21] Corato-Zanarella M, Gil-Molina A, Ji X C, et al. Widely tunable and narrow-linewidth chip-scale lasers from near-ultraviolet to near-infrared wavelengths[J]. Nature Photonics, 2023, 17: 157-164.
- [22] Zia N, Ojanen S P, Viheriälä J, et al. Widely tunable 2 μm hybrid laser using GaSb semiconductor optical amplifiers and a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photonics integrated reflector[J]. Optics Letters, 2023, 48(5): 1319-1322.
- [23] Wang R J, Sprengel S, Vasiliev A, et al. Widely tunable 2.3 μm III-V-on-silicon Vernier lasers for broadband spectroscopic sensing[J]. Photonics Research, 2018, 6(9): 858-866.
- [24] Wang R J, Malik A, Šimonytė I, et al. Compact GaSb/silicon-on-insulator 2.0x μm widely tunable external cavity lasers[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28977-28986.
- [25] Sia J X B, Wang W J, Qiao Z L, et al. Analysis of compact silicon photonic hybrid ring external cavity (SHREC) wavelength-tunable laser diodes operating from 1881-1947 nm[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2020, 56(6): 2001311.
- [26] Fujioka N, Chu T, Ishizaka M. Compact and low power consumption hybrid integrated wavelength tunable laser module using silicon waveguide resonators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(21): 3115-3120.
- [27] Tsuchizawa T, Yamada K, Fukuda H, et al. Micro-photonics devices based on silicon microfabrication technology[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(1): 232-240.
- [28] Billah M R, Blaicher M, Hoose T, et al. Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding[J]. Optica, 2018, 5(7): 876-883.
- [29] Ojanen S P, Viheriälä J, Zia N, et al. Widely tunable (2.47–2.64 μm) hybrid laser based on GaSb/GaInAsSb quantum-wells and a low-loss Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photonic integrated circuit[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(7): 2201028.
- [30] Tran M A, Huang D N, Bowers J E. Tutorial on narrow linewidth tunable semiconductor lasers using Si/III-V heterogeneous integration[J]. APL Photonics, 2019, 4(11): 111101.
- [31] Sia J X B, Wang W J, Qiao Z L, et al. Compact silicon photonic hybrid ring external cavity (SHREC)/InGaSb-AlGaAsSb wavelength-tunable laser diode operating from 1881-1947 nm[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5134-5146.
- [32] Alam A, Wang G H, Liu A, et al. Modeling thermal crosstalk in silicon photonics[C]//Advanced Photonics 2016 (IPR, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF), July 18-20, 2016, Vancouver, Washington, DC: OSA, 2016: ITu2B.4.
- [33] Sherwood-Droz N, Wang H, Chen L, et al. Optical 4x4 hitless silicon router for optical Networks-on-Chip (NoC) [J]. Optics Express, 2008, 16(20): 15915-15922.

## Design and Simulation of Silicon-Based Tunable External Cavity Diode Lasers in the 1967–2033 nm Wavelength Range

Wan Haoran<sup>1</sup>, Yang Yulin<sup>1</sup>, Qiao Zhongliang<sup>1\*</sup>, Li Xiang<sup>2,3</sup>, Jia Xu Brian Sia<sup>2,3</sup>, Yu Wenjun<sup>1</sup>, Weng Dengqun<sup>1</sup>, Li Zaijin<sup>1</sup>, Li Lin<sup>1</sup>, Chen Hao<sup>1</sup>, Zhao Zhibin<sup>1</sup>, Bo Baoxue<sup>5</sup>, Gao Xin<sup>5</sup>, Qu Yi<sup>1</sup>, Liu Chongyang<sup>2,3</sup>, Wang Hong<sup>2</sup>, Zhang Yu<sup>4</sup>, Niu Zhichuan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, School of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Hainan International Joint Research Center for Semiconductor Lasers, Haikou 571158, Hainan, China;

<sup>2</sup>School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore;

<sup>3</sup>Temasek Laboratories@NTU(TL@NTU), Nanyang Technological University, Singapore 637553, Singapore;

<sup>4</sup>State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

<sup>5</sup>National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

### Abstract

**Objective** The tunable laser near the 2 μm wavelength has attracted significant attention due to its importance in gas detection and potential as a core component in high-capacity optical communication technologies. The scheme based on the integration of a silicon

photonic chip with a III-V gain chip is gaining popularity in the research field of external cavity tunable lasers owing to its narrow linewidth and wide tuning range. While previous studies have primarily explored the  $\sim 1.55\ \mu\text{m}$  wavelength range, limited research has been conducted on  $\sim 2\ \mu\text{m}$  wavelength external cavity semiconductor lasers (ECDLs). In addition, in the fields of spatial signal transmission and gas detection, ECDLs must meet higher requirements for the output power, side mode suppression ratio (SMSR), and stability. Therefore, further optimization of the external cavity of the  $\sim 2\ \mu\text{m}$  tunable laser is needed.

**Methods** Based on the 220 nm silicon-on-insulator (SOI) platform, we first used the Lumerical mode to simulate and analyze the mode loss characteristics of optical waveguides with different cross-sectional sizes and bending radii. We then studied the impact of the microring resonator  $G_{\text{gapmrr}}$  on the performance of a vernier filter (including the Q value, side mode suppression ratio, linewidth, and transmission loss). In addition, we analyzed the effect of waveguide termination reflectivity on the stability of the external cavity of a tunable laser and proposed waveguide termination based on the scattering and bending loss characteristics of multimode waveguides to terminate stray light in the waveguide. Finally, a thermal conduction analysis of the vernier filter was performed using Lumerical device, and the thermal analysis data were imported into Lumerical interconnect to study the thermal tuning performance of the tunable laser external cavity.

**Results** Based on the above methodology, Si waveguide widths ranging from 0.28  $\mu\text{m}$  to 0.63  $\mu\text{m}$  facilitate quasi-single-mode transmission within the 1.95–2.05  $\mu\text{m}$  wavelength range (Fig. 2). Investigations of various Si waveguide thicknesses indicate a stable effective refractive-index difference between  $\text{TE}_{00}$  and  $\text{TM}_{00}$  when the waveguide thickness is below 0.24  $\mu\text{m}$  (Fig. 3). Optimizing the waveguide width enables low-loss  $\text{TE}_{00}$  mode transmission in straight waveguides (Fig. 4), and a bending radius exceeding 5  $\mu\text{m}$  tends to approach  $\text{TE}_{00}$  mode losses of approximately 0 dB/cm (Fig. 5). By exploring the impact of  $G_{\text{gapmrr}}$  on the vernier filter performance (as depicted in Fig. 8), it is found that increasing  $G_{\text{gapmrr}}$  enhances the SMSR. However, beyond 250 nm, the improvement stabilizes owing to the reduced coupling coefficients, elongating the effective length of the microring resonators. Consequently, the insertion loss increases with increasing  $G_{\text{gapmrr}}$ , affecting the efficiency of the filter. The linewidth decreases sharply and levels off, whereas the Q factor exhibits an inverse trend. Above 300 nm, the difference in radius between the microrings significantly influences the Q values and transmission losses. The transmission spectrum of the vernier filter (Fig. 9) displays fine fringes and significant changes in the SMSR and full width at half maxima, owing to reflections from the bus waveguide terminator. To address this issue, the proposed multi-mode annular waveguide termination (Fig. 10) effectively terminates stray light, with negligible reflected optical power in the waveguide on the order of  $10^{-12}\ \text{W}$ . The vernier filter achieves wavelength tuning through nickel-chromium alloy microheaters atop the microrings, leveraging thermal-optic effects. Simulations in SOI waveguides reveal changes in the effective refractive index of the  $\text{TE}_{00}$  mode with temperature at wavelengths of 1.95, 2, and 2.05  $\mu\text{m}$  (Fig. 11). Utilizing Lumerical device for thermal conduction simulations, the temperature distribution in the circuit under an applied voltage indicates improved efficiency at 4 V, resulting in a temperature increase of 127 K (Fig. 13). The study delves into the broad and fine-tuning of a silicon-based tunable laser's external cavity, showing both a wide tuning range of 66 nm (1967–2033 nm) at a 3.2 V bias when using a single microheater and a precise tuning with a 0.1 nm/K accuracy when using two microheaters simultaneously (Figs. 14 and 15).

**Conclusions** Research on silicon-based external cavity tunable lasers around the  $\sim 2\ \mu\text{m}$  wavelength remains limited. Using a 220 nm SOI platform, we simulate and analyze the mode loss characteristics of optical waveguides of various sizes. A designed Si waveguide (600 nm  $\times$  220 nm) ensures a low-loss  $\text{TE}_{00}$  single-mode transmission in a curved waveguide with a radius exceeding 5  $\mu\text{m}$ . To investigate the impact of a single microring resonator on vernier filter performance, optimal coupling distances are discussed for applications with different requirements. We propose a highly process-compatible multi-mode annular waveguide termination method. Simulations demonstrate a wide 66 nm tuning range and a fine-tuning accuracy of 0.1 nm/K for the designed silicon-based tunable laser.

**Key words** silicon photonic integration; tunable external cavity diode laser; ring resonator; optical waveguide terminator