

# 片上集成的光学泵浦激光器设计与仿真

王守山\*, 浦国斌, 金川, 张涛, 赵颖

公安部第一研究所, 北京, 100048

**摘要** 光子集成回路和光子芯片具有低功耗、高速率、大带宽等优势,是下一代光信息处理系统的必然趋势,而片上光源是其中的关键技术。设计了一种基于光学微环谐振腔的光学泵浦激光器,泵浦光与激光通过全光控制输出到不同的波导上。结合四能级-二电子能级模型和时域有限差分法进行电磁场仿真,分析了激光输出和粒子态密度的时域特性及稳态电磁场模式分布,约 94 ps 后达到稳态粒子数密度反转分布,1064 nm 泵浦光和 1550 nm 激光分别通过上话路的 Through 端口和下话路的 Add 端口输出。

**关键词** 激光器; 光子集成回路; 四能级-二电子模型

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714010

## Design and Simulation of On-Chip Integrated Optical-Pumping Laser

Wang Shoushan\*, Pu Guobin, Jin Chuan, Zhang Tao, Zhao Ying

The First Research Institute of the Ministry of Public Security, Beijing 100048, China

**Abstract** Photonic integrated circuits (PIC) and photonic chips have the advantages of low power consumption, high speed, and large bandwidth, and they are the inevitable trend of the next generation optical information processing system. And on-chip light source is the key technology of PIC. An optical-pumping laser based on optical microring resonator is proposed, and the pumping light and laser light are output to different waveguides through the all-optical control. Combining the four-level two-electron energy level model and the time-domain finite difference method electromagnetic field simulation, the time-domain characteristics of laser output, particle state density and steady-state electromagnetic field mode distributions are analyzed. After 94 ps, the steady-state particle number density inversion distribution is reached, and pumping light of 1064 nm and laser light of 1550 nm are output to Through port of the upper channel and the Add port of the lower channel, respectively.

**Key words** lasers; photonic integrated circuits; four-level two-electron energy level model

**OCIS codes** 140.3560; 130.3120; 230.1150

## 1 引言

随着信息科学技术的高速发展,集成电路处理庞大的数据能力已愈加相形见绌,以晶体管尺寸缩减为核心的摩尔定律将难以满足未来发展需求。而光子集成回路和光子芯片具有低功耗、高速率、大带宽等优势,是未来光信息处理系统的一种必然

选择<sup>[1-2]</sup>。其中,片上光源是集成回路和光子芯片的关键核心技术之一,对实现片上光互联、光通信等具有重大意义。

光子通信链路的紧密集成使其有潜力提供高数据吞吐量和位密度,同时将功耗和能量消耗降至最低,因此近年来,新一代微型激光器不断发展,垂直腔面发射激光器(VCSEL)<sup>[3-4]</sup>、微盘/腔激光

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-08-27; 录用日期: 2020-09-18

\*E-mail: wangss@fiscan.cn

器<sup>[5-7]</sup>、随机激光器<sup>[8]</sup>、半导体纳米线激光器<sup>[9]</sup>、表面等离子激元激光器<sup>[10-11]</sup>等应运而生,器件尺寸推向微米甚至纳米级。微环谐振腔因具有高品质因数和较小的模式体积,可实现低阈值激光且具有优秀的时间和空间相关性而备受关注<sup>[3,12]</sup>。Liang 等<sup>[13]</sup>报道了通过选择性减少多量子阱有源区的体积而获得紧凑型混合硅微环激光器的工作,电致激光阈值降低了 20% 以上,输出功率提高了 80%。全光集成的光源设计也逐渐成为研究热点,Cai 等<sup>[6]</sup>报道了基于硅基微环结构,通过波导耦合产生携带轨道角动量的涡旋的空间辐射激光器;Cegielski 等<sup>[14]</sup>通过空间光激发钙钛矿微盘产生了波导耦合输出的集成激光器,室温激光阈值低至 4.7 μJ/cm<sup>2</sup>,为下一代光子集成回路发展提供了更广阔的空间。但之前的全光集成激光器设计中都存在空间光的参与,不能实现完全的集成化、小型化,为此本文提出了一种波导输入、输出的集成化全光激光器设计。

本文设计了一种基于光学微环谐振腔的光学泵浦激光器,泵浦光输入与激光输出皆通过硅基波导实现。通过四能级-二电子能级模型和时域有限差分法电磁场模拟,分析了激光器的粒子数态密度布居的动力学过程及稳态激光模式分布,本工作为全光集成的片上激光器设计提供了一种思路和研究方法。

## 2 器件设计

如图 1 所示,片上集成的光学泵浦激光器采用硅基光子集成中常用的“上下话路型微环谐振腔”结构,其中上下话路波导采用硅波导,微环谐振腔为激光增益材料。泵浦光源由上话路波导的 Input 端口输入,上话路波导通过倏逝波与微环谐振腔相互耦合,泵浦微环产生激光,并通过微环的高品质而产生谐振,产生的激光通过倏逝波与下话路波导

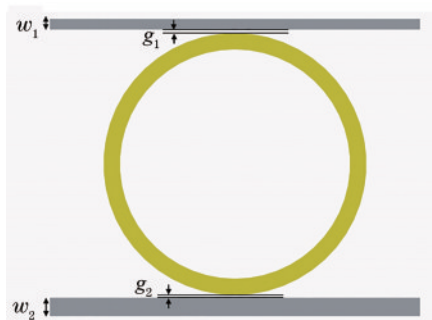


图 1 片上集成的光学泵浦激光器结构示意图

Fig. 1 Structural schematic diagram of on-chip integrated optical-pumping laser

耦合后由 Drop 端口输出。通过优化上、下话路波导尺寸选择波导模式并通过控制间隙优化波导与微环的耦合效率,器件设计尺寸如下:上、下话路波导宽度分别为  $w_1=260$  nm 和  $w_2=450$  nm,厚度为 220 nm,间隙  $g_1=100$  nm 和  $g_2=50$  nm,微环内外径分别为 2.8 μm 和 3.2 μm。

## 3 激光动力学过程仿真与分析

如图 2 所示,微环材料采用四能级-二电子模型,用于描述激光增益和激光产生动力学过程,其中  $N_0$  为基态粒子数布居密度,  $N_3$  为抽运高能级的粒子数布居密度,  $N_2$ 、 $N_1$  分别为激光上、下能级的粒子数布居密度。在泵浦光作用下,粒子从基态  $N_0$  激发到抽运能级  $N_3$ ,粒子通过无辐射跃迁迅速弛豫到亚稳态  $N_2$  能级。激光下能级  $N_1$  是激发态能级,在常温下布居概率为 0,粒子在该能级的寿命很短,很容易产生  $N_2$ 、 $N_1$  之间粒子数的反转分布<sup>[10,15-16]</sup>。

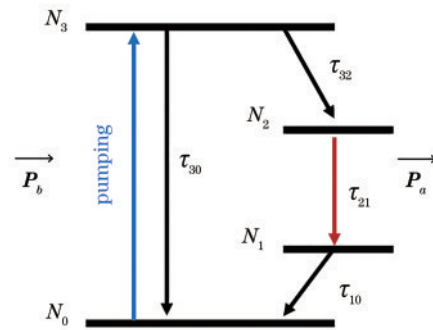


图 2 四能级-二电子激光能级示意图

Fig. 2 Schematic diagram of four-level two-electron energy level model

在简化的半量子模型中,四能级-二电子的电子跃迁可视为两个耦合的偶极谐振子,  $N_0$ 、 $N_3$  对应偶极动量  $P_a$ ,  $N_2$ 、 $N_1$  对应偶极动量  $P_b$ , 谐振方程表示为

$$\frac{d^2 P_a}{dt^2} + \gamma_a \frac{dP_a}{dt} + \omega_a^2 P_a = \xi(N_2 - N_1)E, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 P_b}{dt^2} + \gamma_b \frac{dP_b}{dt} + \omega_b^2 P_b = \xi(N_3 - N_0)E, \quad (2)$$

式中:  $\omega_a$ 、 $\omega_b$  分别对应  $P_a$ 、 $P_b$  的共振频率, 本文取  $\omega_a=1.22 \times 10^{15}$  Hz (对应  $\lambda=1064$  nm)、 $\omega_b=1.77 \times 10^{15}$  Hz (对应  $\lambda=1550$  nm)。

由于泡利不相容原理,每个量子态只能被一个电子占据,因此一个能级中粒子的存在降低了从其他能级泵浦或弛豫的效率。通过两个偶极振荡,四个电子能级的速率方程可表示为<sup>[12]</sup>

$$\frac{dN_3}{dt} = -\frac{N_3(1-N_2)}{\tau_{32}} - \frac{N_3(1-N_0)}{\tau_{30}} + \frac{1}{\hbar\omega_a} E \frac{dP_a}{dt}, \quad (3)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3(1-N_2)}{\tau_{32}} - \frac{N_2(1-N_1)}{\tau_{21}} + \frac{1}{\hbar\omega_e} E \frac{dP_e}{dt}, \quad (4)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_2(1-N_1)}{\tau_{21}} - \frac{N_1(1-N_0)}{\tau_{10}} - \frac{1}{\hbar\omega_e} E \frac{dP_e}{dt}, \quad (5)$$

$$\frac{dN_0}{dt} = \frac{N_3(1-N_0)}{\tau_{30}} + \frac{N_1(1-N_0)}{\tau_{10}} - \frac{1}{\hbar\omega_a} E \frac{dP_a}{dt}, \quad (6)$$

式中： $\tau_{ij}$ 为能级*i*和*j*之间的衰减时间常数；在泵浦电场*E*作用下，各能级粒子布居密度随泵浦项 $E \frac{dP_e}{dt}$ 和自发辐射衰减项 $(N_i - N_j)/\tau_{ij}$ 而变化。通过时域

有限差分仿真可知，泵浦光和激光强度以及四能级粒子布居密度随时间的变化如图 3(a)、(b)所示，粒子布居在 94 ps 达到稳态激光输出。

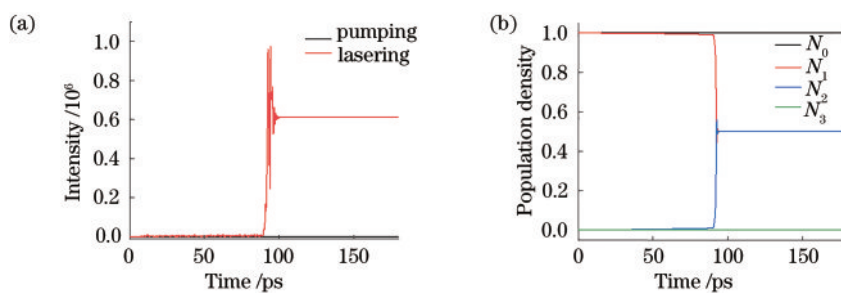


图 3 实验结果。(a) 泵浦光和激光强度随时间的变化曲线；(b) 四能级粒子布居密度随时间的变化曲线  
Fig. 3 Experimental results. (a) Change curve of pumping light and laser intensity with time; (b) change curve of four-level particle population density with time

### 4 电磁场仿真与分析

光学微环谐振腔在空间和时间维度上具有光场局域性，可有效减小模式体积和调控模式，增强光与物质的相互作用，是光信息科学研究中的重要物理平台，被广泛应用于激光器、滤波器、调制器、传感器等领域<sup>[6, 17-19]</sup>。在 $\lambda=1064$  nm 和 $\lambda=1550$  nm，

光场在微环内多束相干相长形成显著的回音壁微腔共振，品质因子*Q*高达 $2.1 \times 10^4$ ，微环与波导通过倏逝波作用可实现波长与上下话路波导的耦合。如图 4 所示，本文利用时域有限差分法对所设计的片上集成的光学泵浦激光器进行了电磁场分布仿真。如图 4(a)所示， $\lambda=1064$  nm 时，泵浦光主要通过上话路 Through 端口输出；如图 4(b)所示， $\lambda=$

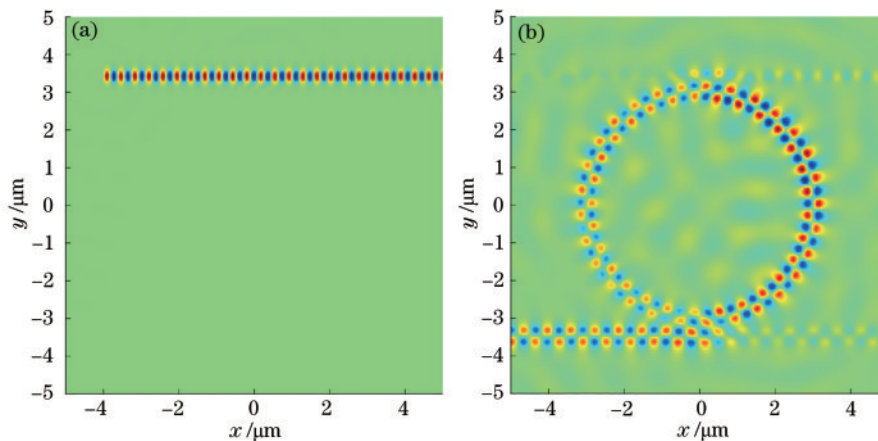


图 4 仿真结果。(a) $\lambda=1064$  nm；(b) $\lambda=1550$  nm  
Fig. 4 Simulation results. (a)  $\lambda=1064$  nm; (b)  $\lambda=1550$  nm

1550 nm 时, 稳态激光主要通过下话路 Drop 端口输出, 泵浦光未通过下话路 Drop 端口输出。在该设计中, 微环增强了泵浦光与四能级-二电子模型增益介质的相互, 同时作为一个天然的滤波器实现将泵浦光与激光分别耦合到上、下路波导中并通过 Through 端口和 Drop 端口输出, 可提高光子集成回路中波导的单色性, 避免 cross-talk 效应。

## 5 结 论

本文基于光学微环谐振腔结构设计了一种全光学泵浦的片上集成激光器。利用四能级-二电子能级模型对激光产生和粒子布居密度的动力学过程进行了仿真与分析, 该结构在 94 ps 后达到稳态粒子数密度反转布居。结合稳态电场分布, 泵浦光和激光输出端口分别主要通过上话路的 Through 端口和下话路的 Add 端口输出, 可有效避免 cross-talk 效应, 提高信息处理的准确性。本文所提四能级-二电子能级模型和时域有限差分法电磁场模拟对于理解和设计全光-光子集成器件具有一定的指导意义, 对于实现光子集成的片上光互联、光通信等具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Wen J C, Li X H, Li Y, et al. Review of the development of photonic integrated circuits [J]. *Application of IC*, 2019(7): 1-3.  
温景超, 李旭红, 李泱, 等. 光子集成电路发展综述 [J]. *集成电路应用*, 2019(7): 1-3.
- [2] Sun C Z, Yang S H, Xiong B, et al. Progress in high-speed electroabsorption modulated lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(7): 0701002.  
孙长征, 杨舒涵, 熊兵, 等. 高速电吸收调制激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2020, 47(7): 0701002.
- [3] Jiang X F, Zou C L, Wang L, et al. Whispering-gallery microcavities with unidirectional laser emission [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(1): 40-61.
- [4] Jiang X W. Polarization-independent wavelength-tunable vertical cavity surface emitting laser based on two-dimensional grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0623003.  
江孝伟. 基于二维光栅的偏振无关波长可调谐垂直腔面发射激光器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0623003.
- [5] Moiseev E, Kryzhanovskaya N, Maximov M, et al. Highly efficient injection microdisk lasers based on quantum well-dots [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4554-4557.
- [6] Cai X L, Wang J W, Strain M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters [J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [7] He G, Xu Y, Cao B, et al. Study of optical properties of high-Q GaN disk-shaped microresonant cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1223001.  
何耿, 徐俞, 曹冰, 等. 高 Q 值 GaN 碟状微米谐振腔的光学特性研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1223001.
- [8] Zheludev N I, Prosvirnin S L, Papasimakis N, et al. Lasing spaser [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(6): 351-354.
- [9] Eaton S W, Fu A, Wong A B, et al. Semiconductor nanowire lasers [J]. *Nature Reviews Materials*, 2016, 1(6): 1-11.
- [10] Wang D Q, Bourgeois M R, Guan J, et al. Lasing from finite plasmonic nanoparticle lattices [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(3): 630-636.
- [11] Yang L, Duan Z Y, Ma L H, et al. Surface plasmon polariton nanolasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(20): 202409.  
杨琳, 段智勇, 马刘红, 等. 表面等离子激元纳米激光器综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(20): 202409.
- [12] Hill M T, Gather M C. Advances in small lasers [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 908-918.
- [13] Liang D, Fiorentino M, Srinivasan S, et al. Low threshold electrically-pumped hybrid silicon microring lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(6): 1528-1533.
- [14] Cegielski P, Giesecke A L, Neutzner S, et al. Monolithically integrated perovskite semiconductor lasers on silicon photonic chips by scalable top-down fabrication [J]. *Nano Letters*, 2018, 18(11): 6915-6923.
- [15] Chang S H, Cao H, Taflove A. Four-level two-electron FDTD model of lasing action in a semiconductor [C] // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, June 22-27, 2003, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2003: 382-385.
- [16] Chang S H, Taflove A. Finite-difference time-domain model of lasing action in a four-level two-electron atomic system [J]. *Optics Express*, 2004, 12(16): 3827-3833.

- [17] Zhu H H, Yue Y H, Wang Y J, et al. High-sensitivity optical sensors based on cascaded reflective MZIs and microring resonators[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 28612-28618.
- [18] Shoman H, Jayatilleka H, Jayatilleka H, et al. Compact wavelength-and bandwidth-tunable microring modulator[J]. Optics Express, 2019, 27(19): 26661-26675.
- [19] Ehrlichman Y, Khilo A, Popović M A. Optimal design of a microring cavity optical modulator for efficient RF-to-optical conversion[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2462-2477.