

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.08.008

微腔激光器 Al 和 Ag 电极的光电学特性研究*

姚齐峰 王 帅 娄小平 祝连庆

(北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心 北京 100016)

摘 要: III-V 族微腔激光器中的 P 型金属电极通常采用的 Ti-Pt-Au 的合金方式, 而其中的 Ti 层对通信波长 1 550 nm 的激光具有很强的吸收, 不适合在高密度光子集成器件中使用。为了代替传统的合金方式, 采用二维解析法计算单一金属 Al 和 Ag 金属限制下的微腔中光学模式品质因子, 发现这两种新型电极具有更小损耗。另外在实验上分别制作金属 Al 和 Ag 的电极的微腔激光器, 得到与理论预测一致的测试结果。由于这两种电极价格便宜, 工艺简单并与 CMOS 工艺相容, 因此在光子集成器件中具有很高的应用前景。

关键词: 微腔激光器; 金属电极; 光子集成

中图分类号: TN36 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:**

Study of electric and optical properties of microcavity laser with Al and Ag electrode

Yao Qifeng Wang Shuai Lou Xiaoping Zhu Lianqing

(Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments,
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China)

Abstract: P-type metallic electrode in III-V microcavity lasers traditionally adopt the Ti-Pt-Au alloys mode, while the Ti layer has a strong optical absorption for the laser at the communication wavelength 1 550 nm, which is not suitable for the application in photonic integration. In order to replace the traditional alloy method, this paper calculates the optical model quality factor in the microcavity under the constraints of single metal Al and Ag metal using analytical method, and found that these two new electrodes have smaller optical losses. In addition, experiments were carried out on the micro-cavity lasers with electrodes of metal Al and Ag, respectively, and the results were well consistent with the theoretical predictions. Moreover, the two electrodes are cheap, simple and compatible with CMOS process, so they have high application prospects in photonic integration.

Keywords: microcavity laser; metal electrode; photonic integration

0 引 言

随着光子集成技术的发展, 各种微型的具有高品质因子的光学结构成为近年重点研究对象, 如基于回音壁模式的微盘^[1]、光子晶体^[2]和 DBR 的垂直面发射激光器^[3]等。为了适应高密度光电集成的需要, 金属限制的波长和亚波长尺寸的谐振腔得到很快的发展^[4-8], 例如具

有三明治结构的纳米柱形电注入激光器, 突破衍射极限的等离子激光器等。Ti-Pt-Au 是经常用于半导体激光器的 P 电极, 然而 Ti 层对通信波长 1 550 nm 的光是具有很强的吸收, 并不利于用于微纳激光器中, 而事实上, 铜和铝是广泛应用在微电子回路中, 因此如果能将这些金属应用在微腔激光器中, 不仅能取代具有较强光损耗的 Ti 层, 提高光学品质因子, 而且工艺与传统 CMOS 工艺相容, 非常适合应用于具有大数据传播和处理的光子互联

收稿日期: 2017-07 Received Date: 2017-07

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目-基于光纤光栅的飞机结构载荷谱构建新方法研究(54675053)、长江学者和创新团队发展计划(IRT1212, 光电信息与仪器)、北京市重大科技计划项目(PXM2013-014224-000077, PXM2012-014224-000019)资助

系统中。在接近衍射极限尺寸下的谐振腔中,也有小组报道在金属 Ag 限制 InGaAsP 微盘结构上实现光脉冲泵浦下室温激射。可见 Al、Cu 和 Ag 都有可能用作 P 型电极和光学模式限制。无论哪种金属都会引入一定的吸收损耗,解决的办法是在介质有源层和金属之间引入低折射率的介质层作为模式隔离,之前也通过有限时域差分法研究三角形和正方形的模式情况,也通过特征矩阵^[9]求解研究多层波导中金属限制下低折射率层厚度对模场分布,阈值增益的影响。

本文是继前阶段研究^[10-11]的基础上计算了传统 P 型电极对光学模式的影响,发现 Ti 层对于光学模式的吸收起了决定性作用,而不需要 Ti 层的 Al 和 Ag 在光学限制和吸收损耗方面具有明显的优势,在实验中通过平面半导体工艺技术在包含压应变的量子阱的 InGaAlAs 外延片上制作微盘激光器,分别蒸发 Al 电极和 Ag 电极,都实现室温连续电注入激射,实验结果表明这两个电极都具有用作金属限制微纳激光器的前景。

1 Ti 层对光场模式的影响

作为传统 P 型电极的一部分,Ti 层主要是用于增强金属与介质之间的粘附性,改善器件的肖特基特性,但是会引入很大的光学损耗。在这一部分我们通过解析法定量分析 Ti 层的对光学模式的影响。低阈值微盘激光器依赖的是全反射下沿着壁边缘传播具有高品质因子的回音壁模式,但是由于其光场主要集中在盘的边缘附近,当边缘被金属限制后会引入很强的光学损耗,激光器阈值会相应增加,因此需要引入低折射率介质层作为隔离层将回音壁模式的光场与金属层隔离,以期减弱金属层的影响。现在考虑半径为 $1\ \mu\text{m}$ 的圆盘中,在 $400\ \text{nm}$ 厚的介质层和 $100\ \text{nm}$ 的金属层 Au 之间引入 Ti 后对整个光场模式的影响。在计算中圆盘材料假设为 InGaAlAs,在波长为 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近时的介电常数为 10.24 ,Au 和 Ti 的介电常数分别为 $-104 + 3.68i$ 和 $-8.47 + 34.7i$ ^[12-13],可以看出 Ti 层具有更大的虚部说明该金属具有更强的吸收损耗。图 1(a) 给出 $\text{TE}_{0,1}$ 模的模式波长和品质因子随着 Ti 层厚度的变化关系(介质和金属层 Au 的厚度固定,分别为 400 和 $100\ \text{nm}$),对于波长变化而言,Ti 层厚度对模式波长的影响比较小,模式波长从没有 Ti 层时的 $1557.2\ \text{nm}$ 变成 Ti 层厚度为 $50\ \text{nm}$ 时的 $1556.7\ \text{nm}$,总共仅有 $0.5\ \text{nm}$ 的变化范围。但是光学品质因子从 6000 急剧下降到 Ti 层厚度为 $20\ \text{nm}$ 时的 600 ,到 Ti 层厚度为 $50\ \text{nm}$ 时为 310 ,然后基本上保持恒定。可见 Ti 层对光学品质因子是非常显著的,因此不利于应用于波长尺寸的微纳器件。

为了消除 Ti 层对光场的吸收,需要考虑隔离层厚度

的影响,为此计算在 Ti-Au 厚度为 50 和 $100\ \text{nm}$ 时,半径 $R = 1\ \mu\text{m}$ 的微腔内 $\text{TE}_{0,1}$ 模的模式波长和品质因子随隔离层厚度变化情况,如图 1(b) 所示,(Ti-Au 的厚度固定,分别为 $50\ \text{nm}$ 和 $100\ \text{nm}$) 随着隔离层厚度的增加,模式波长逐渐减少,品质因子从 25 升高到当隔离层厚度为 $460\ \text{nm}$ 时的最大值为 330 。可见 Ti 层的影响是与其他金属是不一样的,即使增加隔离层厚度,但是品质因子也得不到很大提高,所以在微纳腔中 Ti 层是不适合采用的。

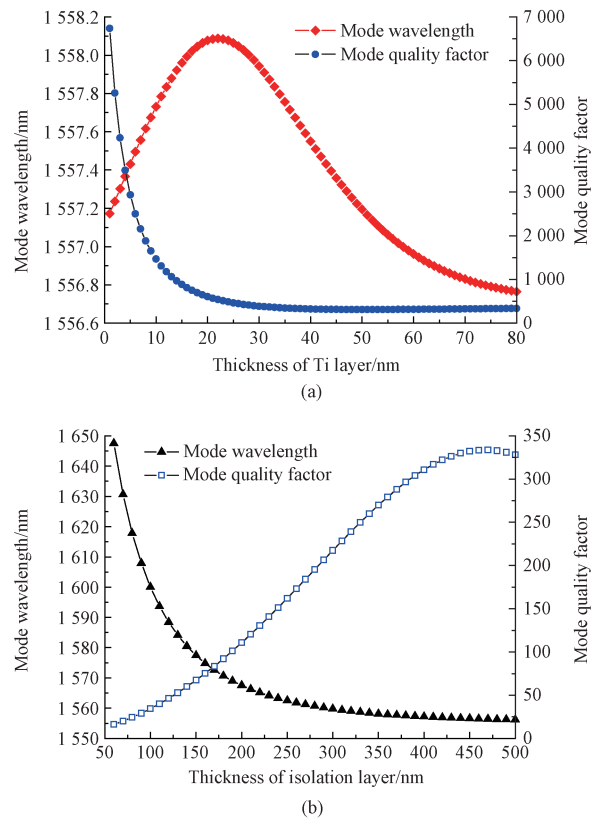


图 1 (a) $\text{TE}_{0,1}$ 模的模式波长和品质因子随着 Ti 层厚度的变化关系;(b) $\text{TE}_{0,1}$ 模的模式波长和品质因子随着隔离层厚度的变化关系

Fig. 1 (a) Mode wavelength and quality factor of $\text{TE}_{0,1}$ as a function of Ti layer thickness;(b) Mode wavelength and quality factor of $\text{TE}_{0,1}$ as a function of dielectric layer thickness

为了验证其他金属限制的可行性,本文也计算 Ag, Al 和 Cu 覆盖在器件表面时 $\text{TE}_{0,1}$ 模品质因子随隔离层厚度的变化情况,其结果如图 2 所示,可以发现在隔离层厚度约为 $460\ \text{nm}$ 时模式的光学品质因子达到极值,其中 Ag 和 Al 分别为 10559 和 10722 ,高于 Au 和 Cu 的 9730 和 4375 ,可见用 Ag 和 Al 代替 Au 可以提高器件的光学特性,另外在没有隔离层时 TE 模的光学品质因子只有

73,但是引入隔离层后能提高两个量级,但是一旦引入 Ti 层以后,从图 1 的结果可以看出,模式品质因子会急剧下降,综合以上计算结果,发现在微纳激光器中用 Ag 和 Al 代替传统电极 Ti-Pt-Au 是完全可行也是必要的。

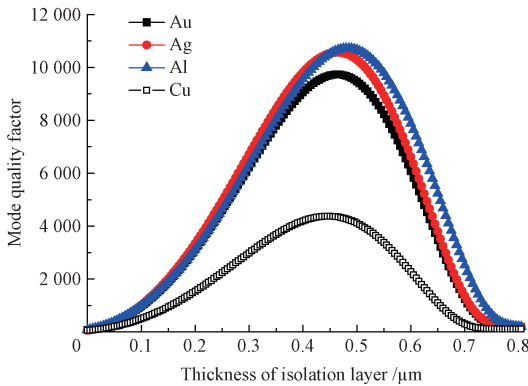


图 2 在 100 nm 厚金属 Au、Ag、Al 和 Cu 覆盖时半径 $R = 1 \mu\text{m}$ 的微腔内 $\text{TE}_{0,1}$ 模光学品质因子随隔离层厚度的变化

Fig. 2 Mode quality factor of $\text{TE}_{0,1}$ as a function of isolation layer thickness with the different metallic confinement layer of 100 nm Au, Ag, Al and Cu, respectively at microcavity $R = 1 \mu\text{m}$

2 Al 和 Ag 电极激光器实验

2.1 微纳激光器制作

整个激光器制作流程如下^[14-16]:首先在外延片上通过 PECVD 上沉积 800 nm 厚的 SiO_2 ,作为刻蚀的掩膜层,接着通过甩胶、接触式光刻、显影和固化过程将图形转移到光刻胶上,然后通过感应耦合的等离子刻蚀(ICP)技术干法刻蚀 SiO_2 ,再通过去膜剂除去残存的光刻胶,这一步完成光刻胶的图形转移到 SiO_2 上,接着通过 ICP 刻蚀 InP 外延片直至到衬底的 InP 上,深度大约为 4.5 ~ 5.5 μm ,然后再通过 HF 溶液除去表面残存的 SiO_2 。刻蚀完后的 InP 需要制作电极才能实现电致发光,为此首先通过 PECVD 第 2 次沉积 450 nm 厚 SiO_2 作为绝缘层,和第 2 次光刻和 ICP 刻蚀开出电极窗口,然后通过正面蒸厚度为 350 nm 厚的 Ag 或者 Al 作为器件的 P 电极,再接着通过研磨衬底来减薄到 110 μm 的厚度以便于解理,最后蒸上 Au-Ge-Ni 作为 N 电极,就可以将器件单独解理下来放在镀铜的板上进行测试。图 3 所示为蒸发 Al 电极的微腔激光器的显微图像,其中微盘半径为 15 μm ,输出波导宽度为 2 μm 。

2.2 微柱激光器性能测试

图 4 所示为微柱激光器测试的实验装置,器件放在



图 3 经过蒸发 Al 电极和解理后的器件显微图像
Fig. 3 Microscopic image of the device after evaporation of Al electrode and cleavage

三维转动的平台上,通过单模或者多模光纤与器件的波导输出端进行对准直接耦合,移动位移平台使得收集的光强度最大时认为光纤正好对准在波导上,然后将光纤与光谱仪相接,这样可以测试光谱数据。另外通过测试光强和注入电流,电压的变化得到 $P-I-V$ 曲线,可以判断阈值电流大小和等效热电阻。整个装置通过上方的 CCD 监控来判断探针时候压在器件上。

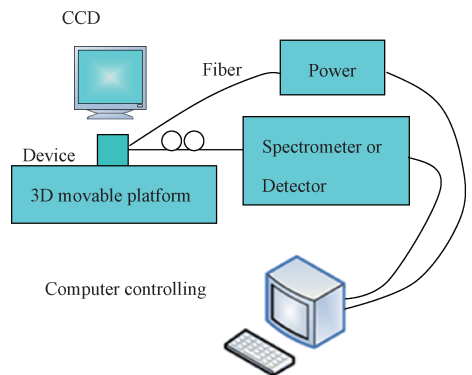


图 4 微柱激光器的测试装置
Fig. 4 Measurement setup of Micropillar laser

3 实验结果与分析

本文对金属 Al 和 Ag 作为电极覆盖下半径为 15 μm 的微盘进行了 $P-I-V$ 曲线测试,其结果如图 5(a)和(b)所示,可以看出阈值电流大概为 18 mA,通过对 I-V 曲线拟合后等效热电阻为 30 Ω ,整个结电压包括 P-N 结和肖特基结为 1.44 V,该值比传统的 Ti-Pt-Au 中的热电阻 22 Ω 和结电压 0.88 V 高,可见 Al 电极的电学特性并没有传统的好,电阻高相应产生的热效应也大,因此器件的饱和电流只有 35 mA,而从图 5(b)中可以看到 Ag 电极下阈值电流为 15 mA,热电阻为 8.2 Ω ,整个结电压为

0.85 V,器件的电学特性比传统的好很多,无论是从热电阻或者是结电压方面,由于其热效应小,所以饱和电流达到60 mA,接近 Al 电极的 2 倍,出光功率也比 Al 电极高很多。

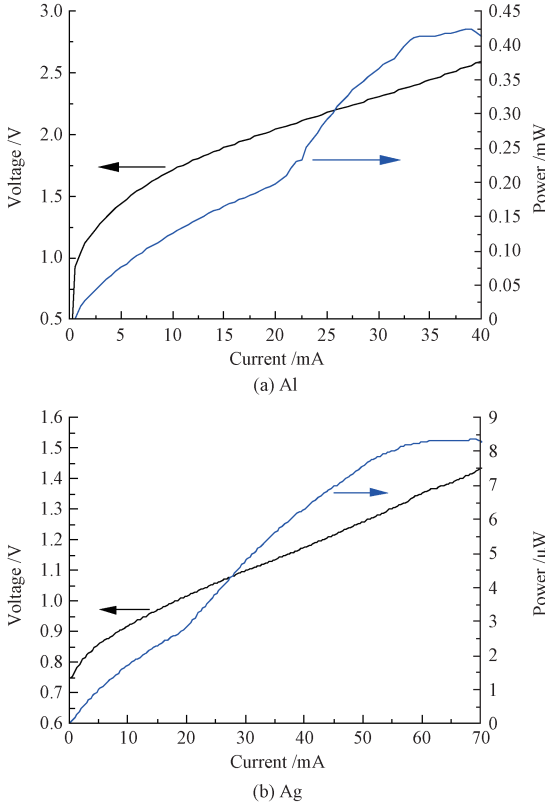


图5 金属 Al 和 Ag 电极下的微腔激光器的 P-I-V 曲线
Fig.5 P-I-V curve of microcavity laser with the electrode Al and Ag, respectively

接着测试器件的光学特性,金属 Al 和 Ag 覆盖下器件的激光光谱显示在图 6 中。当微盘被金属 Al 覆盖时,如图 6(a) 所示,插图中给出了阈值电流为 18 mA 下的光谱图,可以发现多个纵模为和横模同时出现在光谱中,结果说明金属 Al 覆盖下非常好的光学限制,其中纵模谱间隔为 7.1 nm,按照纵模间隔公式:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi R n_g} \tag{1}$$

可以得到群折射率 n_g 为 3.32。在电流为 30 mA 时,表现出非常好的单模激光,其波长为 1 565 nm,边模抑制比为 20 dB。当微盘被金属 Ag 覆盖时,如图 6(b) 所示,同样出现多纵模和横模的情况,这也说明 Ag 的光学限制性和 Al 的基本一样,但是中心波长在 1 540 nm 附近,相比于 Al 覆盖的微盘情况,波长蓝移是由于 Ag 的热效应弱,温度低引起的。在电流为 26 mA 时,边模抑制比也达到 20 dB,另外模式间隔也为 7.1 nm,从而表明 Ag 和 Al 的光学特性是基本一致的,除了因为 Al 的电阻产生的热效应强之外。

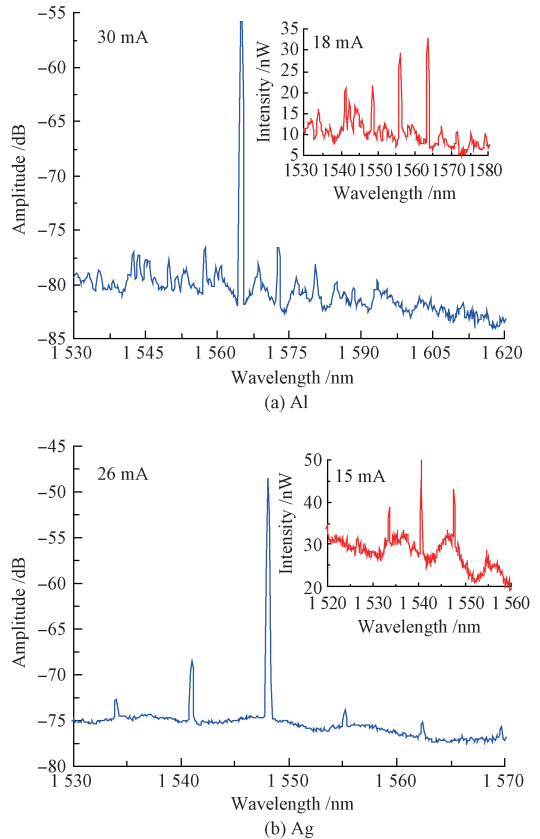


图6 金属 Al 和 Ag 覆盖微盘激光器的激光光谱图
Fig.6 Lasing spectra of microdisk laser with the metallic confinement of Al and Ag, respectively

4 结 论

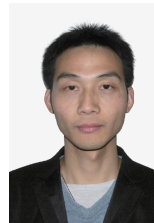
本文理论上分析了微盘激光器在传统电极和金属覆盖下因为 Ti 层的吸收造成很强的光学损耗,不利于在纳米尺寸的激光器中使用。为了提高光学品质因子,也分析了利用 Al 和 Ag 作为电极的可行性,发现两者的光学限制要比金更好,而且价格更便宜,工艺简单。在实验上,通过平面半导体工艺技术,制作了金属 Al 和 Ag 电极的量子阱微盘激光器,两激光器均能实现室温激光,通过测试两者的电学和光学性能,发现两者光学性能一致之外,Al 的热电阻要比 Ag 的高很多,更大的热效应影响整个器件的发光效率和饱和电流强度,如果在合金工艺上有所突破,并解决电学性能的情况下,Al 是完全可以作为电极应用在微盘激光器中。

参考文献

[1] VAHALA K. Optical microcavities [J]. Nature, 2003, 424(6950):839-46.
[2] PAINTER O, LEE R K, SCHERER A, et al. Two-

- dimensional photonic band-Gap defect mode laser [J]. Science, 1999, 284(5421):1819.
- [3] JEWELL J L, SCHERER A, MCCALL S L, et al. Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers [J]. Electronics Letters, 1989, 25(17):1123-1124.
- [4] HILL M T, OEI Y S, SMALBRUGGE B, et al. Lasing in metallic-coated nanocavities [J]. Nature Photonics, 2007, 1(10):589-594.
- [5] HILL M T, MARELL M, LEONG E S, et al. Lasing in metal-insulator-metal sub-wavelength plasmonic waveguides [J]. Optics Express, 2009, 17(13):11107-12.
- [6] NING C Z, LI D B, DING K. Semiconductor plasmonic nanolasers [J]. International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices, 2010: 55-56.
- [7] CHUANG S L, LU C Y, MATSUDAIRA A. Metal-cavity Nanolasers [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 3(2):288-292.
- [8] DING K, LIU Z C, YIN L J, et al. Room-temperature continuous wave lasing in deep-subwavelength metallic cavities under electrical injection [J]. Physical Review B Condensed Matter, 2015, 85(4):120-120.
- [9] 秦润杰, 张清鹏, 卢秋朋. 多导体传输线电容电感矩阵的分析求解 [J]. 电子测量技术, 2015, 38(6):34-36.
QIN R J, ZHANG Q P, LU Q P. Analysis and solution of capacitance and inductance matrix of multi conductor transmission line [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6):34-36.
- [10] YAO Q F, HUANG Y Z, ZOU L X, et al. Analysis of mode coupling and threshold gain control for nanocircular resonators confined by isolation and metallic layers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(5):786-792.
- [11] YANG Y D, HUANG Y Z, WANG S J. Mode analysis for equilateral-triangle-resonator microlasers with metal confinement layers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(12):1529-1536.
- [12] PRUCHA E J. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. New York: Academic Press, 1985: 189.
- [13] VIAL A, GRIMAULT A S, MACIAS D, et al. Application to the modeling of improved analytical fit of gold dispersion: extinction spectra with a finite-difference time-domain method [J]. Physical Review B, 2005, 71(8):085416-085422.
- [14] WANG S J, LIN J D, HUANG Y Z, et al. AlGaInAs-InP microcylinder lasers connected with an output waveguide [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(18):1349-1351.
- [15] LIN J D, ZOU L X, HUANG Y Z, et al. Wide angle emission and single mode deformed circular microlasers with a flat side [J]. Applied Optics, 2012, 51(17):3930-3933.
- [16] JIAO W, YUAN W, AND CHANG H. System level simulation of a micro resonant accelerometer with geometric nonlinear beams [J]. Journal of Semiconductors, 2015, 36(10):104007

作者简介



姚齐峰, 2008 年于北京理工大学获得学士学位, 2013 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学讲师, 主要研究方向为微纳光电子集成。

E-mail: yaoqifeng@bistu.edu.cn

Yao Qifeng received his B. Sc. degree from Beijing Institution of Technology University in 2008, received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2013, now he is teacher in Beijing information science and Technology University. His main research interest include micro/nano opto-electronic integration.