

硅基氮化镓波长可调 DFB 激光器的模拟分析

王永强, 诸波, 胡芳仁, 茅帅帅, 夏丽, 仇乐
(南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210046)

摘要: 基于严格耦合波以及介质平板波导理论, 构建了硅基氮化镓分布反馈激光器的二维稳态物理模型。且利用多物理场直接耦合分析软件 Comsol Multiphysics 求解波动方程, 得到了分布反馈激光器在可见光各波段形成单模输出的电场模一维、二维图谱, 以及相对应的入射波长与电场模关系曲线。结合硅基光微机电系统技术和微加工技术, 本文提出利用悬空的自支撑氮化镓周期可调光子光栅实现分布反馈激光器波长可调。数值模拟表明, 在光栅的格子数目、光栅厚度、光栅宽度以及有源层厚度一定的情况下, 改变光栅周期可以实现分布反馈激光器输出不同波长激光。理论分析与仿真结果基本一致, 证明所建立激光器模型具有一定的合理性, 得出的仿真数据为实现分布反馈激光器波长可调提供了有意义的参考。

关键词: 分布式反馈激光器; 波长可调; Comsol Multiphysics; 硅基光微机电系统

中图分类号: TN242 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.08.009

Simulation analysis of silicon-based GaN wavelength-tunable DFB laser

WANG Yong-qiang, ZHU Bo, HU Fang-ren, MAO Shuai-shuai, XIA Li, ZHANG Le
(Nanjing University of Posts and Telecommunications, College of Optoelectronic Engineering, Nanjing 210046, China)

Abstract: Based on the rigorous coupled-wave theory and dielectric slab waveguide theory, a two-dimensional steady physical model is constructed for a silicon-based GaN distributed feedback (DFB) laser. The wave equation is solved by multiphysics field coupling analysis software Comsol Multiphysics, one-dimensional and two-dimensional electric field modes of the DFB laser's single mode output in visible wavelength region is obtained, and the corresponding relationship between the incident wavelength and the electric field mode is also obtained. Combined with silicon-based optical MEMS technology and micro-machining technology, a wavelength-tunable GaN DFB laser with self-supported gallium nitride periodic photonic grating is proposed. Numerical simulation shows that different single mode wavelength output from the GaN DFB laser can be realized with a certain number of grating lattice, grating height, grating width and active layer thickness. The theoretical analysis and the simulation results are consistent, which proves that this laser model has certain rationality. The simulation data provide a meaningful reference for the realization of the tunable wavelength from the GaN DFB laser.

Key words: distributed feedback laser; wavelength tunable; Comsol Multiphysics; Si-based optical microelectromechanical

1 引言

近年来, 作为高速大容量光通信系统波分复用和时分复用系统中的关键器件, 同时也是光测试系统和快速波长交换等系统的重要光源, 可调谐激光器受到越来越广泛的关注^[1]。例如, 在阐述激光器的构造基础上, 对一种新型具有空间重

叠性的平面-光栅腔三波长 TEA CO₂ 激光器的分

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61274121); 江苏省自然科学基金项目 (No. BK2012829); 南京邮电大学人才引进项目 (No. NY210008) 资助。

作者简介: 王永强 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光纤通信与光波导技术。

收稿日期: 2013-12-09

析^[2],将具有牺牲层结构的反射镜制备成光微机电系统与多量子阱有源区光子纵向耦合结构得到可调谐垂直腔面发射激光器^[3],基于微电子机械系统(MEMS)技术制备外腔可调谐激光器^[4]等研究都是较好的尝试。在众多可调谐半导体激光器的实现形式中,外腔结构因具有线宽窄、调谐范围大、输出功率高和边模抑制比高等显著优点^[5],目前较为常见。

分布反馈(DFB)激光器因动态单模、尺寸小、功耗低、电光转换效率高、寿命长、波长可调谐及易于做成光子集成电路等诸多优点,在相干光通信、光学精密测量以及可调谐二极管激光吸收光谱技术等领域有着广泛而重要的应用^[6]。同时,随着 MEMS 技术与半导体材料生长技术的日趋成熟,在硅基底上制作可调谐氮化镓光栅以及以光栅为基础制备光滤波器、光反馈器件等不断被成功报道^[7-9]。然而到目前为止,关于硅基氮化镓制备的波长可调 DFB 激光器研究报导却相对较少,并且将 MEMS 与 DFB 激光器光源集成的研究也鲜见报道。

本文利用有限元软件 Comsol Multiphysic,建立了氮化镓 DFB 激光器的二维模型。通过对可见光波段进行单纵模激光输出的模拟仿真,得到了 DFB 激光器谐振发光条件下各波段结构参数与输出波长。根据 DFB 激光器工作原理,提出在硅基衬底上制备悬空的氮化镓半导体光子光栅,结合微驱动原理与仿真数值,就可以通过改变光栅周期,控制特定波长的单模输出。这为实现基于 MEMS 技术的 DFB 激光器波长可调提供了理论依据。

2 理论模型

DFB 激光器的激光振荡由光栅形成的光耦合来提供,根据布拉格反射条件:

$$\Lambda = \frac{m\lambda}{2n} \quad (1)$$

其中, Λ 为光栅周期; m 代表布拉格阶数(一般取 1); λ 为真空中的光波长; n 为介质有效折射率。只有满足这一条件的光波才能在介质中形成振荡。

为了简化计算,这里只研究 TE 模单模传输特性。令光波沿 Z 方向传播。如图 1 所示的直角坐标系,TE 波从 $Z=0$ 处入射和反射, X 为模型的纵向,沿 X 方向分别为硅基底层、氮化镓有源层、氮化镓光栅以及空气层。 Z 为模型的径向,根据耦合波理论,由于光栅的衍射作用,虽然可能有无穷对不同阶的正向波和反向波,但是只有传播常数 $\beta \approx \beta_B = \frac{l\pi}{\Lambda}$ 的一

对正向波和反向波占绝对优势。因此,在耦合波分析中,只考虑这一对正向波和反向波,而其他均忽略不计。通过求解,耦合系数为:

$$k = \frac{k_0^2}{2\beta N^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta[n^2(x,z)] E^2(x) dx \quad (2)$$

式中, k_0 为真空中的传播常数; $\Delta[n^2(x,z)]$ 代表波导部分的折射率; $N^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} E^2(x) dx$, $E(x)$ 为沿 x 方向的场强分布函数。

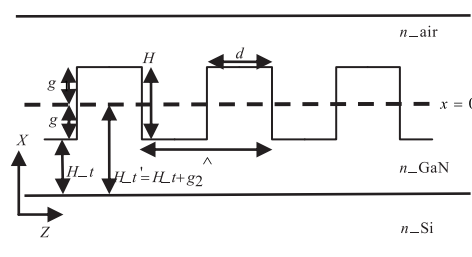


图1 DFB 激光器波导结构工作原理示意图

进一步推导,可以求出代表不同传播模式 $TE_{00}, TE_{01}, TE_{02} \dots$ 的特征值 $\beta_i, i = 0, 1, 2, \dots$ 。模式的数目依赖于 $H-t'$ 的厚度和每一层折射率。

我们下面将探讨图 1 所示波导结构模型的单模传输条件。根据介质平板波导理论,假定只有 TE_0 模式可以传播,即单模传输,入射波沿 z 方向入射,波长为 λ 。由于电磁场在界面处连续,并且场消失较快,通过解亥姆霍兹方程,平板波导的传播问题即可简化为电磁场传播常数的本征值问题。

本文关注波长 400 ~ 700 nm 的可见光波段的传播特性,故只要求出 400 nm 时的单模传输条件,即可满足要求。最终推导得出有源层厚度 $H-t$ 不能大于 84 nm,光栅高度 H 不能大于 168 nm,而光栅格子数目和光栅厚度分别取经验值 50 和 50 nm。上述推导供仿真模型设计时参考。

为实现 DFB 激光器波长可调谐,本文提出采用外腔调谐结构中的机械调谐^[10],如图 2 所示,光栅采用静电梳齿结构驱动^[11],两端连接机械弹簧做为悬梁臂。可动梳齿连接于光栅,固定梳齿连接于固定锚点。当施加一定电压后,产生的静电力驱动可动梳齿,带动光栅结构拉伸,从而进行光栅周期调谐。随着光栅周期变化,便可得到关于反馈式布拉格光栅的谐振波长。

根据微驱动原理,梳状驱动器所产生的静电作用力方程如下^[12]:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \left(\frac{wh}{(s-x)^2} + \frac{h}{g} \right) \frac{L}{w+g} V^2 \quad (3)$$

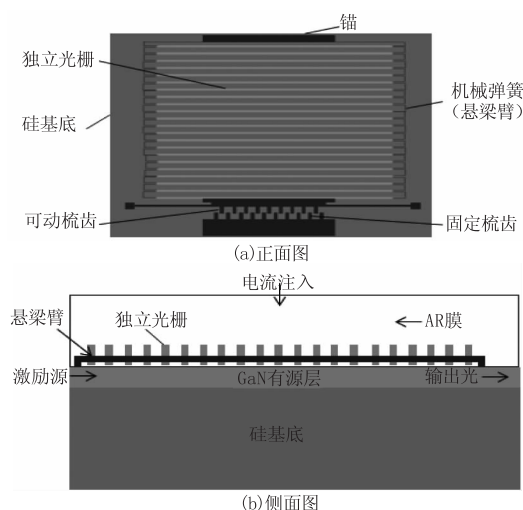


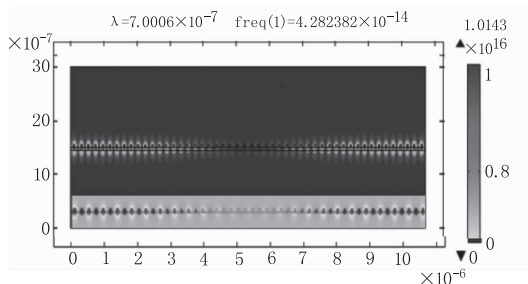
图2 可调谐DFB激光器结构示意图

其中, ε_0 是真空介电常数; w, h, g, s, x 和 L 分别是驱动器弹簧的宽, 弹簧的厚度, 可动和固定梳针的间距, 可动梳针端到固定梳针末端的距离以及驱动器位移和梳状驱动器的总长。由式(1)可知, 当光栅间距固定时, 光栅波长变化为:

表1 DFB激光器模型各参数取值

参数	取值	备注	参数	取值	备注
λ	700.06 nm	入射波长	n-Si	1.2	基底折射率
d	50 nm	光栅宽度	N-t	n-GaN	有源层的折射率
H	0.06 μm	光栅厚度	N	50	光栅格子数目
Λ	214.3 nm	光栅周期	H-t	0.04 μm	有源增益层厚度
$n\text{-air}$	1	空气层折射率	n-GaN	2.56	GaN 折射率

图3为入射波长 $\lambda = 700.06 \text{ nm}$ 时形成的谐振效果。其中上半部分由电场模式表征, 下半部分由 z 方向的场强分布表征, x, y 方向场强为零。从图中可以发现, 当 $\lambda = 700.06 \text{ nm}$ 时, 电场模式非常明显, 振幅峰值达到 1.0143×10^{16} 。此时, 光栅周期 $\Lambda = 214.3 \text{ nm}$, 由布拉格公式可以求出波导部分有效折射率约为 1.633, 这与实际值相吻合。

图3 $\lambda = 700.06 \text{ nm}$ 时 TE_0 模电场模式图
以及对应的 z 方向的场强分布图

当光栅周期 $\Lambda = 214.3 \text{ nm}$ 固定后, 对入射波长进行参数化扫描求解, 沿 z 方向插入一条二维切割线, 得到电场模一维模式线图, 如图4所示。图中, 最

$$\Delta\lambda = 2n_{r2}\Delta x = 2n_{r2}\frac{F}{k_{\text{总}}} \quad (4)$$

可见, 波长变化与电压平方成正比关系, 通过调节电压即可使得激光器光栅周期可调。

3 数值模拟结果与讨论

下面, 我们使用 Comsol Multiphysics 4.2a 软件对 DFB 激光器模型进行模拟仿真。模型设计时, 令两侧端口分别为激励端口和出射端口, 上下均为散射边界条件。其中激励端口输入功率为 1 W, 模式类型为横向 TE 波, 模式数为 1。

对 DFB 激光器模型进行网格剖分, 并分别对光栅厚度 d 、光栅高度 H 、光栅周期 Λ 、增益层厚度 $H-t$ 以及入射波长 λ 进行参数化扫描求解, 其中每扫描一个参数时, 其他参数不变。入射波长由激励端口开始在光栅区不断耦合, 然后在激励端口和出射端口之间形成谐振直到实现最好的谐振效果为止。以红光波段为例, 初始入射波长设为 700 nm, 通过不断的参数扫描, 最终得到模型结构参数取值, 如表1所示。

上面模式线图曲线为入射波长 $\lambda = 700.06 \text{ nm}$ 时所得, 其他的波长对应模式线图集中在下面。从图中可以看出, $\lambda = 700.06 \text{ nm}$ 时, 其模式谐振效果远远优于其他波长, 很好地抑制了其他波长的模式传输。这说明该 DFB 激光器模型结构参数下, 波长谐振线宽很窄。

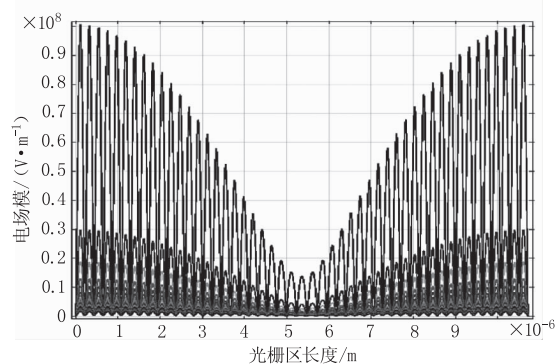


图4 DFB激光器模型红光波段在光栅区的模式线图

为进一步验证上述结论, 利用 Comsol Multiphysics 4.2a 软件后处理功能在该 DFB 激光器物理模型中插入一个点, 通过点绘图, 观察红光波段在该物理模型中的线宽。如图5所示, 可以看出, 参数

化扫描波长求解后,发现 $\lambda = 700.06 \text{ nm}$ 时的模式谐振峰值最大,线宽约仅为 0.0013 nm 。现将表 1 中仿真数据代入式 (1) 中计算,得出布拉格波长 $\lambda = 649.4 \text{ nm}$,这与实际波长偏差约 50 nm 。因为光在光栅区的作用下,存在一定的相移,另外耦合波实际传输中是在有源层和光栅之间,所以我们计算的有效折射率也有一定误差,但总体与理论分析一致。

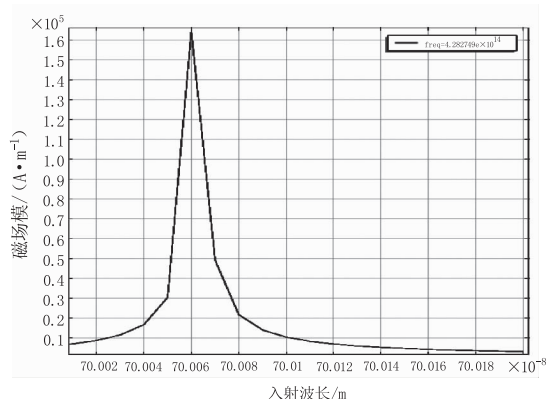


图5 DFB 激光器模型红光光谱线宽示意图

同样的仿真方法,在保持光栅的格子数目 N 、光栅厚度 H 、光栅宽度 d 以及有源层厚度 $H-t$ 一定的情况下,对可见光波段其他颜色光进行参数化扫描求解。发现输出波长和光栅周期有一个良好的对应关系,结果如表 2 所示。

其中有效折射率表征整个波导部分折射率,包括光栅区和有源层。从表中可以看出,随着波长的减小,光栅周期整体呈减小趋势,这满足布拉格条件。基于此,在可调谐 DFB 激光器设计中,提出在硅基衬底上制备悬空的氮化镓半导体光子光栅,结合微驱动原理与仿真数值,通过改变光栅周期,从而控制特定波长的单模输出。这为波长可调 DFB 激光器提供了理论依据。

从仿真结果可以看出,当满足布拉格条件时,光能够形成较好的谐振,并产生激光。但是由于存在相移,因而仿真结果会与理论分析存在一定的偏差。另外,本文从软件仿真数据方面为分布反馈激光器波长可调提供了依据。

表 2 可调 DFB 特定波长的对应参数

波段	波长/nm	光栅周期/nm	占空比	有效折射率	线宽/nm	振幅峰值/($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)
红光	700.06	214.3	0.2333	1.51517	0.0013	1.0143×10^{16}
橙光	609.97	174.6	0.2864	1.60947	0.0014	7.1698×10^{14}
黄光	575.01	156	0.3205	1.66733	0.0012	8.0045×10^{16}
绿光	525.01	108.02	0.4629	1.88961	0.0012	1.4418×10^{16}
蓝光	469.98	112	0.4464	1.86528	0.001	9.2448×10^{14}
紫光	420	100.62	0.4969	1.93899	0.0008	2.1654×10^{16}

4 结 论

对基于 MEMS 的氮化镓材料可调谐 DFB 激光器的工作机理进行了分析与研究,建立了仿真模型。通过对该模型在可见光波段单纵模激光输出的分析与仿真,确定了可调谐 DFB 激光器特定波长的结构参数。从仿真结果来看,在光栅的格子数目、光栅厚度、光栅宽度以及有源层厚度一定的条件下,结合微机电系统技术,通过机械调节方式,改变光栅周期,可以实现分布反馈激光器的波长可调谐。这对可调谐激光器的设计具有一定的理论参考意义。

参考文献:

[1] LUO Yanheng, ZHANG Ruijun. Wavelength tunable laser and its progress [J]. Journal of Micro-nano Electronic Technology, 2006, 43(5): 214-218. (in Chinese)

罗雁横, 张瑞君. 波长可调谐激光器及其进展 [J]. 微纳电子技术, 2006, 43(5): 214-218.

[2] LIU Xiaoyong, LI Yude, LU Pei, et al. Isospace three wavelength tunable TEA CO_2 laser research [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(8): 641-643. (in Chinese)

刘效勇, 李育德, 卢佩, 等. 同空间三波长可调谐 TEA CO_2 激光器的研究 [J]. 激光与红外, 2006, 36(8): 641-643.

[3] GUAN Baolu, ZHANG Jinglan, REN Xiujuan, et al. With a wide tuning range of micro-nano optical system tunable vertical cavity surface emitting laser research [J]. Journal of Physics, 2011, 60(3): 034206-1. (in Chinese)

关宝璐, 张敬兰, 任秀娟, 等. 具有宽调谐范围的微纳光机电系统可调谐垂直腔面发射激光器研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(3): 034206-1.

[4] HU Shenglei, FU Yanfeng, ZHANG Zhang, et al. Used in coherent optical tunable laser [J]. Journal of optical com-

- munications research, 2013, 176(2): 43 – 45. (in Chinese)
- 胡胜磊, 傅焰峰, 张璋, 等. 用于相干光通信的可调谐激光器的研究[J]. 光通信研究, 2013, 176(2): 43 – 45.
- [5] Berger J D, Zhang Yongwei, Grade J D, et al. Widely tunable external cavity diode laser based on a MEMS electrostatic rotary actuator[J]. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001, 2(2): T – u
- [6] SUN Qibing, ZHENG Yi, LI Aiping, et al. Cr^{4+} : YAG tunable laser research[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(8): 725 – 727. (in Chinese)
- 孙启兵, 郑义, 李爱萍, 等. Cr^{4+} : YAG 可调谐激光器研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(8): 725 – 727.
- [7] Hidehisa Sameshima, Takuma Tanae, Kazuhiro Hane. A GaN electromechanical tunable grating on Si substrate[J]. IEEE Photonics Technology Letters, March, 2011, 23(5): 281 – 283.
- [8] H Sameshima, T Tanae, F Hu, et al. GaN pitch-variable grating fabricated on Si substrate[J]. Optical MEMS and Nanophotonics(OPT MEMS), 2010 International Conference on, 2010: 79 – 80, 2010: 79 – 80.
- [9] JiaSheng YE, YOSHIKI KANAMORI, Fangren HU, et al. Narrow-band tunable optical filters using the self-suspended subwavelength grating[J]. Journal of Modern Optics, 2007, 54(6): 827 – 832.
- [10] K Hane, T Kobayashi, F Hu, et al. Variable optical reflectance of a self-supported Si grating[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(14): 141109 – 141109 – 3.
- [11] ZHANG Ruijun. Wavelength tunable DFB laser and its progress[J]. Integrated Circuit Communication, 2006, 24(2): 42 – 47. (in Chinese)
- 张瑞君. 波长可调谐 DFB 激光器及其进展[J]. 集成电路通讯, 2006, 24(2): 42 – 47.
- [12] K Takahashi, E Bulgan, Y Kanamori, et al. Submicron comb-drive actuators fabricated on thin single crystalline silicon layer[J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2009, 56(4): 991 – 995.