

文章编号: 1001-3806(2016)01-0060-04

基于氮化镓的通信波段可调 DFB 激光器的研究

朱敏杰, 胡芳仁*, 杨海艳

(南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210046)

摘要: 为了利用悬空的周期可调光栅控制激光器的波长输出, 采用了微机电系统技术中微驱动器与分布反馈激光器光栅相结合的结构, 根据严格耦合波理论和介质平板波导理论, 针对光通信的 C 波段, 利用有限元软件 COMSOL, 建立了基于氮化镓的波长可调分布反馈激光器 2 维稳态模型。分析了 1550nm 处 2 维电场模式图以及激光波长线宽图, 得到了激光波长与光栅周期的对应关系。结果表明, 在光栅厚度、高度以及增益层厚度等结构参量一定的情况下, 激光波长与光栅周期呈现与理论分析基本一致的似线性关系。该研究为该器件设计以及制备的后期工作开展提供了理论指导意义。

关键词: 激光技术; 分布反馈激光器; 氮化镓; 波长可调; C 波段; 微机电系统

中图分类号: TN242

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.01.012

Analysis of wavelength-tunable DFB laser based on GaN in communication band

ZHU Minjie, HU Fangren, YANG Haiyan

(College of Photoelectric Engineering, Nanjing University of Posts and Communications, Nanjing 210046, China)

Abstract: In order to control laser wavelengths output of laser by suspending period-adjustable gratings, a structure combining microdriver of micro-electro-mechanical system (MEMS) technology with grating of distributed feedback (DFB) laser was proposed. According to rigorous coupled-wave theory (RCWA) and medium slab waveguide theory, using infinite element software COMSOL, a two-dimensional steady physical model of wavelength-adjustable DFB laser based on GaN was constructed for C-band in optical communication. 2-D electric field mode picture and lasing wavelength linewidth picture at 1550nm were analyzed and the corresponding relationship between grating period and lasing wavelength was gotten. The results show that, with certain structural parameters such as grating lattice thickness, height and gain layer thickness, lasing wavelength and grating period present similar linear relationships being consistent with theoretical analysis. The study will give good theoretical guidance for carrying out the design and preparation of the device.

Key words: laser technique; distributed feedback laser; GaN; wavelength-tunable; C-band; micro-electro-mechanical system

引言

随着现代光通信技术的不断发展, 光网络处理信息量不断增加, 波分复用 (wavelength-division multiplexing, WDM) 技术得到广泛应用。这令波长可调激光器得到广泛关注, 因为如果采用传统固定波长激光器作为 WDM 技术的光源, 那么同一个光发送机就需要封装几十个不同波长的激光器, 这不仅使得设备体积增大, 而且成本也大大增加, 严重影响网络的利用

率^[1]。

如果能够使光发送机发送不同波长的信号光源, 那么可以有效降低 WDM 技术成本, 同时, 波长可调激光器已经成为降低光网络成本的重要组成部分, 也是当前光通信器件研究的热点^[2-3]。国内外学者已在可调谐半导体激光器上做过较好的试验。主要有: (1) 将多个分布反馈 (distributed feedback, DFB) 激光器采用并联形成阵列在同一个芯片上生长, 后经放大耦合, 得到覆盖较宽的调谐范围^[4-5]; (2) 采用微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 转镜作为外部耦合器起到波长粗选, 采用温度调节来精确控制^[6]; (3) 由压应变量子阱和多个布喇格反射镜组成的出射光垂直于芯片表面的可调谐垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)^[7]; (4) 通过改变谐振腔的结构尺寸或形状来改变激光波长的可调谐外腔式激光器^[8]。并且, 随着 MEMS 技术

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61274121); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2012829); 南京邮电大学人才引进科研启动基金资助项目 (NY212007)

作者简介: 朱敏杰 (1990-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光通信与光波导技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: huf@njupt.edu.cn

收稿日期: 2014-11-20; 收到修改稿日期: 2014-12-09

的发展,集成可调谐 GaN 光栅的滤波器已有报道^[9-12]。然而到目前为止,利用 GaN 材料制备光栅周期可调且范围覆盖通信 C 波段的分布反馈激光器研究鲜见报道。

本文中在严格耦合波方法(rigorous coupled-wave analysis, RCWA)及平板波导理论上,通过数值计算,建立了基于 GaN 材料可调分布反馈激光器的 2 维模型,分析了其出光特性,在满足单模输出条件下,重点关注了光栅周期与 C 波段各波长关系,为实现激光器的波长可调提供仿真依据。

1 可调谐 DFB 激光器结构及实现方式

DFB 激光器的激光振荡满足布喇格条件:

$$\Lambda = m\lambda / (2n_{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中, Λ 为光栅周期, λ 为真空中的光波长, m 为光栅级数,通常取 $m = 1$, n_{eff} 为介质等效折射率。

分析(1)式可知,当 n_{eff} 和 λ 都固定的条件下,改变悬空的光栅周期能够进行激光器选频,形成受激辐射,实现激光的单纵模输出。故如何进行周期变化以及变化范围是本文中的研究重点。

作者采用了基于 GaN 材料的可调谐外腔式激光器结构,如图 1 所示,它采用了静电梳状微驱动器,通过 MEMS 驱动器来拉伸光栅间隔,使悬空的光栅周期得到微调,控制谐振波长输出。

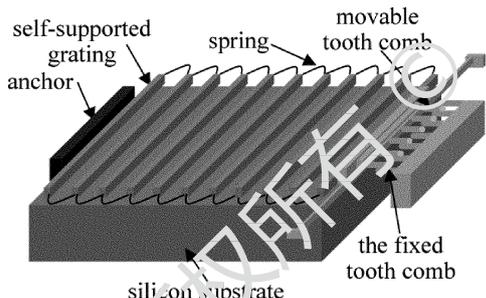


Fig. 1 3-D structure of tunable grating in DFB laser

梳状驱动器所产生的静电作用力为^[13]:

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

式中, ϵ_0 是真空介电常数, w 和 h 分别是驱动器弹簧的宽度和厚度, g 为可动和固定梳齿的间距, s 为可动梳针端到固定梳针末端的距离, x 为驱动器位移, L 为梳状驱动器的总长, V 为平板间施加的电压。

由(2)式可以看出静电力,所以只要改变适当的电压来调整梳齿间静电力,那么就能推动弹簧位移,进而达到光栅周期的变化。

2 耦合波理论分析^[14]

由于在仿真时都采用入射 TE 波,故这里只探讨

TE 模单模传输特性。

根据赫姆霍兹方程有:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E_y(x, z) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} E_y(x, z) + k_0^2 \tilde{n}^2 E_y(x, z) = 0 \quad (3)$$

式中, k_0 为真空波数, \tilde{n} 为折射率沿 z 方向的周期性函数, $\tilde{n} = n_{\text{eff}} + \Delta n \cos(2\beta_0 z)$ 。将 \tilde{n} 代入(3)式,可以写成:

$$k_0^2 \tilde{n} = k_0^2 [n_{\text{eff}} + i n_{\text{eff}}' + (\Delta n + i \Delta n') \cos(2\beta_0 z)]^2 \quad (4)$$

由于光栅调制微扰,故(4)式中忽略 2 阶小量,可得到近似解:

$$k_0^2 \tilde{n} \approx \beta^2 + 2i\alpha\beta + \beta_0 \kappa \cos(2\beta_0 z) \quad (5)$$

式中, i 为虚数, $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$ 为传播常数, $\beta_0 = m\pi/\Lambda$ 为布喇格波数, α 为阈值增益, κ 为复耦合系数。耦合系数大小与光栅的结构有关,包括光栅格子数目、周期、深度及占空比,代表了前向波与后向波的耦合。

耦合波理论表明,光栅的衍射会产生无穷对不同阶的正向波和反向波,现在只考虑强度最大的一对正向波和反向波,分别用 $A(z)$ 和 $B(z)$ 来表示。

可以假设波动方程通解为:

$$E(z) = A(z) \exp(i\beta_0 z) + B(z) \exp(-i\beta_0 z) \quad (6)$$

代入(3)式得到耦合波方程组:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} + (\alpha - i\delta)A = i\kappa B \\ -\frac{dB}{dz} + (\alpha - i\delta)B = i\kappa A \end{cases} \quad (7)$$

式中,相位失谐因子 $\delta = (\beta^2 - \beta_0^2)/(2\beta_0) \approx \beta - \beta_0$ 。

从(7)式可以看出,内置的光栅不断提供正向波和反向波彼此间的反馈,两者叠加之和形成的光场使得 DFB 激光器能够产生良好的单纵模激射特性。下面将结合耦合波理论以及平板波导理论计算 DFB 激光器光栅的相关参量。

图 2 是周期性光栅波导结构图,光栅厚度和高度分别表示为 d 和 H ,光栅周期为 Λ ,增益层厚度为 H_1 ,增益层和光栅层的等效厚度可表示为 H_1' ,令入射光在 $z=0$ 处入射,光波沿 z 方向传输。整个光栅结构沿 x 方向分别为 Si 衬底层、GaN 有源层、GaN 光栅及空气层,可以将其等效成介质平板波导结构,空气层高度为

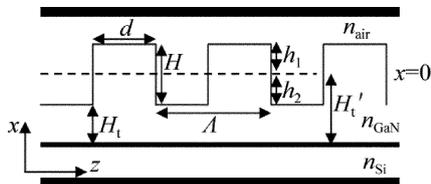


Fig. 2 Waveguide structure of periodic grating

h_1 , 氮化镓高度为 h_2 , 折射率分别表示成 n_{Si} , n_{GaN} 和 n_{air} 。

等效折射率可以表示为:

$$n_{eff} = \sqrt{(1 - \Gamma)n_{air}^2 + \Gamma n_{GaN}^2} \quad (8)$$

式中, $\Gamma = d/\Lambda$ 为占空比, $n_{air} = 1$ 。

由于 GaN 工作波长不同, 其折射率也会发生改变, 可由下式^[15]拟合得出:

$$n_{GaN}^2 - 1 = 2.60 + \frac{1.75\lambda^2}{\lambda^2 - 0.256^2} + \frac{4.1\lambda^2}{\lambda^2 - 17.86^2} \quad (9)$$

本文中讨论 C 波段波长范围 (1525 ~ 1565) nm, 计算得 $n_{GaN} \in (2.3175, 2.3165)$ 。

联立(1)式和(8)式可得:

$$4\Lambda^2 + 876.48\Lambda - \lambda^2 = 0 \quad (10)$$

不难发现, 光栅周期与激射波长都为 2 阶, 呈近似一次函数关系, 以此选定的波长求解出的周期大小作为下一节中模拟仿真时的参考, 而实际仿真得出的周期大小也可对上式进行验证。

3 数值仿真

本文中进行的数值模拟采用软件 COMSOL Multiphysics 4.2a, 对 DFB 激光器内布喇格光栅建立模型, 选取参量见表 1。

Table 1 Grating structure parameters of DFB laser

parameters	value	remarks
d/nm	50	grating thickness
H/nm	60	grating height
H_g/nm	80	gain layer thickness
n_{Si}	1.2	substrate refractive index of Si
λ/nm	1550	approximate lasing wavelength
n_{GaN}	2.317	refractive index of GaN
n_{air}	1	refractive index of air
Λ/nm	669	grating period
N	50	number of grating lattice

在温度为 273K 条件下, 从光栅左侧端口输入功率为 1W 的横向 TE 波。其中, 光栅高度、厚度以及增益层厚度均是在其余参量不变情况下所取得的最优组合参量, 故取得上述表中的值。

选取近似激射波长 1550nm 处, 利用(9)式计算光栅周期理论值为 673.15nm, 而后在该理论值附近进行光栅周期的参量化扫描。经模拟数据表明, 当 $\Lambda = 669\text{nm}$ 时, 电场模式效果最好。

如图 3 所示, 其中 x - y 平面为光栅尺寸图, z 方向为电场强度, 颜色的深浅代表了不同的谐振强度。可以看到, 从左侧入射的 TE 波很好地限制在增益层区域, 形成反馈而输出, 电场振幅峰值能量达到了 $1.9574 \times 10^8 \text{J}$ 。

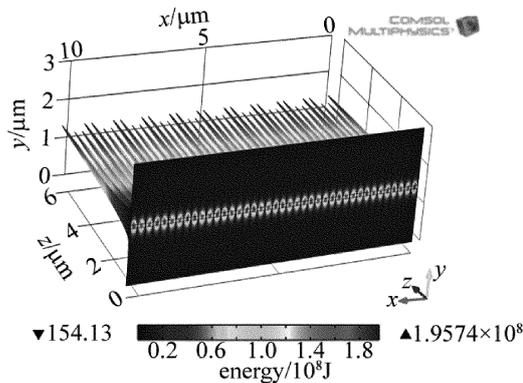


Fig. 3 Energy distribution of electric field with TE wave incident on grating when $\Lambda = 669\text{nm}$

图 4 是在选定周期为 669nm, 求解中心波长在 1550nm 附近各波长输出的电场能量。分析频谱图可以看到, 主峰中心波长为 1549.992nm, 全局电场能量达到了 $2.40298 \times 10^{-7} \text{J}$ 。中心波长两边分别在 1534.28nm 和 1566.44nm 处有一个边峰, 但其全局电场能量远小于主峰, 且都远离中心波长。对中心波长所在峰进行放大分析, 可以看到该谐振峰半峰全宽 (full width at half maxima, FWHM) 约 0.0024nm, 说明线宽较窄。

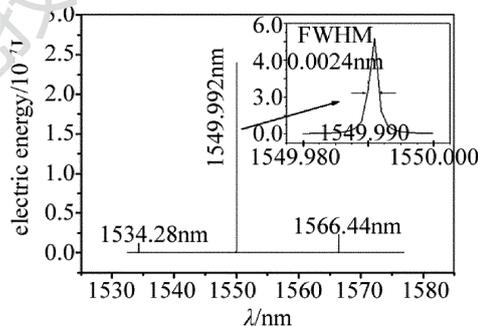


Fig. 4 Spectrum near center wavelength at 1550nm

将上述仿真所得光栅周期 $\Lambda = 669\text{nm}$ 代入(1)式, 可反过来计算理论激射波长 $\lambda = 1541\text{nm}$, 而与实验值波长 1549.99nm 存在一定的蓝移, 这主要是由于存在相移以及等效折射率计算误差等因素, 造成光经过光栅区, 谐振峰值发生一定偏差, 并且该偏差始终保持理论计算略小于实验波长。

图 5 为对波长从 (1549.9 ~ 1550.1) nm 范围内进行参量化扫描, 扫描步长为 0.01nm 所得到的电场模式图, 纵坐标表征 z 方向的场强分布, 其中振幅最强、谐振效果最好的即为 $\lambda = 1549.99\text{nm}$, 这说明光栅对其它波长的光都起到了很好的抑制作用, 满足单模激光输出的条件。

由于本文中所设计 DFB 激光器光栅结构参量主要为通信 C 波段服务, 故在可调过程中, 控制光栅周期参量至关重要, 可通过调整周期变化来改变激射波长的单模输出。因此, 参照上述探索光栅周期的方法,

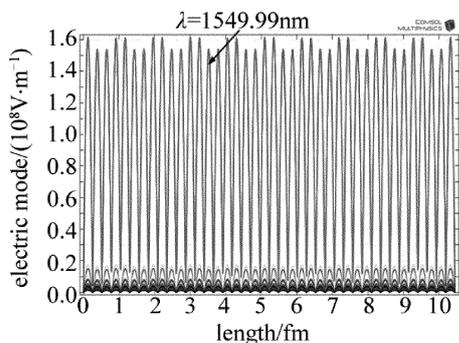


Fig. 5 Electric field mode near center wavelength at 1550nm

在光栅厚度、高度和增益层厚度等结构参量一定的条件下,对覆盖整个 C 波段的每个波长(精确到 1nm)都进行了实验仿真,如图 6 所示,每一个输出波长都对应一个光栅周期。从图 6 可以看出,随着输出波长的增加,光栅周期也呈上升趋势,分散的点近似成线性关系,符合布喇格理论,这也与前面理论分析所得出的结论一致。最后经过线性拟合,得到拟合公式 $y = 0.847x - 648.4$,拟合效率为 0.984。

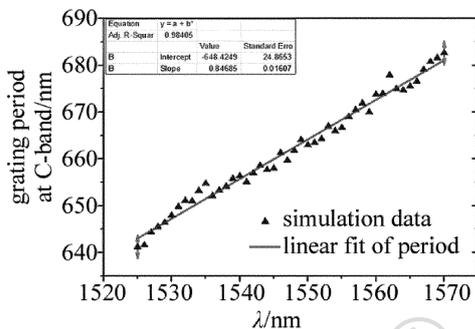


Fig. 6 Corresponding graph between wavelength and grating period of C-band

4 结论

将基于氮化镓 C 波段可调 DFB 激光器和 MEMS 技术相结合,利用 MEMS 技术的微驱动器来改变激光器光栅周期。通过对 DFB 激光器理论的深入分析,建立了仿真模型。模型分析结果与理论计算一致,在光栅厚度、高度以及增益层等结构参量最优化的情况下,通过对整个 C 波段的仿真,确定了各波长与光栅周期的对应关系,并给出了拟合公式,为该激光器件设计以及制备的后期工作开展提供了理论指导意义。

参 考 文 献

[1] GAUDINO R, CURRI V, BOSCO G, *et al.* On the use of DFB lasers

for coherent PON [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition. New York, USA; IEEE, 2012:1-3.

[2] LIAO P, MO Sh W. 1310nm/1550nm semiconductor laser power supply for the optical fiber measurement [J]. Laser Technology, 2013, 37(4):541-546(in Chinese).

[3] ZHAI Y J, FU Y F, DONG X G. Research on the modulation characteristics of external cavity tunable lasers[J]. Study of Optical Communications, 2014, 40(5):48-51(in Chinese).

[4] YASHIKI K, SATO K, MORIMOTO T, *et al.* Wavelength-selectable light sources fabricated using advanced microarray-selective epitaxy [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(7):1619-1621.

[5] SASAHATA Y, MATSUMOTO K, NAGIRA T, *et al.* Tunable 16 DFB laser array with unequally spaced passive waveguides for back-side wavelength monitor[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. New York, USA; IEEE, 2014:1-3.

[6] OOHASHI H, NUNOYA N, ISHII A. Tunable semiconductor lasers for optical communications[C]//Optical Fiber Communication Conference. New York, USA; IEEE, 2012:521-522.

[7] BERGER J D, ZHANG Y W, GRADE J D, *et al.* Widely tunable external cavity diode laser using a MEMS electrostatic rotary actuator [C]//Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001. New York, USA; IEEE, 2001:198-199.

[8] GEERLINGS E, RATTUNDE M, SCHMITZ J, *et al.* Micro-mechanical external-cavity laser with wide tuning range[C]// IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2007. New York, USA; IEEE, 2007:731-734.

[9] YE J Sh, KANAMORI Y, HU F R, *et al.* Self-supported subwavelength gratings with a broad band of high reflectance analysed by the rigorous coupled-wave method[J]. Journal of Modern Optics, 2006, 53(14):1995-2004.

[10] HU F R, KANAMORI Y, OCHI K, *et al.* A 100nm thick InGaN/GaN multiple quantum-well column-crystallized thin film deposited on Si(111) substrate and its micromachining[J]. Journal of Micro-mechanics and Microengineering, 2008, 19(3):1-4.

[11] YE J Sh, YOSHIKI K, HU F R, *et al.* Narrow-band tunable optical filters using the self-suspended subwavelengthgrating[J]. Journal of Modern Optics, 2007, 54(6):827-832.

[12] WANG Y Q, ZHU B, HU F R. Simulation analysis of silicon based GaN wavelength tunable DFB laser[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(8):874-878(in Chinese).

[13] SAMEISHIMA H, TANAE T, HANE K. A GaN electromechanical tunable grating on Si substrate [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(5):281-284.

[14] KOGELNIK H, SHANK C V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(5):2327-2335.

[15] BARKER A S, ILEGEMS M. Infrared lattice vibrations and free-electron dispersion inGaN [J]. Physical Review, 1973, B7(2):741-749.