

文章编号: 1001-3806(2019)02-0174-05

垂直腔半导体光放大器中的等效反射率分析

卢静^{1,2}, 罗斌^{1*}

(1. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031; 2. 重庆电子工程职业学院 电子与物联网学院, 重庆 400030)

摘要: 为了优化垂直腔半导体光放大器(VCSOA)在不同应用中的性能,以及用通用计算方法获得准确的端面反射率,考虑到器件内部光场分布特点,采用角频谱理论和传输矩阵的方法,取得了器件中分布布喇格反射器(DBR)等效反射率与光束半值谱宽的数据,进行了理论分析和实验验证。结果表明,等效反射率随着结构周期增加而变大,但是当周期大于25时基本不再变化;与只考虑正入射情况相比,修正后的DBR等效反射率小了2%~4%;等效反射率随着半值谱宽 θ_{FWHM} 增大而减小。该研究为准确计算膜堆层数对DBR等效反射率的影响提供理论指导,优化了VCSOA的工作性能。

关键词: 激光器; 反射率; 传输矩阵法; 角频谱; 垂直腔半导体光放大器; 分布布喇格反射器

中图分类号: TN248.4 文献标志码: A doi: 10.7510/jjgs.issn.1001-3806.2019.02.005

Analysis of equivalent reflectivity of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers

LU Jing^{1,2}, LUO Bin¹

(1. School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Electronics and Internet of Things, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 400030, China)

Abstract: In order to optimize the performance of vertical cavity semiconductor optical amplifiers(VCSOA) in different applications and obtain accurate reflectivity with the general calculation method, considering the characteristics of light field distribution inside the device, the equivalent reflectivity of the distributed Bragg reflector(DBR) and the full width at half maximum of the beam in the device were obtained by using angular spectrum theory and transmission matrix method. The theoretical analysis and experimental verification were carried out. The results show that the equivalent reflectivity increases with the increase of structure period. However, when the period is greater than 25, it will not change any more. Compared with the case of normal incidence only, the revised equivalent reflectivity of DBR is less 2%~4%. Equivalent reflectance decreases with the increase of full width at half maximum θ_{FWHM} . The study provides theoretical guidance for accurately calculating the effect of stack number on equivalent reflectivity of DBR and optimizing the performance of VCSOA.

Key words: lasers; reflectivity; transfer matrix method; angular spectrum; vertical cavity semiconductor optical amplifier; distributed Bragg reflector

引言

垂直腔半导体光器件具备体积小、功耗低、易于集成等优点,历来受到人们的重视^[1-5]。其中,垂直腔半导体光放大器(vertical cavity semiconductor optical amplifier, VCSOA)可以看作是偏置在阈值电流以下(但

非常接近)工作的激光器,它可以对入射光进行法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)放大。前期的研究工作表明,作为光放大器,入射端面反射率对VCSOA的增益以及饱和输出特性有重要影响;应用于慢光时,VCSOA的时延带宽积也与入射端面反射率密切相关。因此在VCSOA设计制作中,准确控制其端面反射率,对于优化VCSOA在不同应用中的性能,是至关重要的^[6-10]。

VCSOA中由多层高、低折射率交替的膜堆构成的分布布喇格反射器(distributed Bragg reflector, DBR)来提供光反馈,DBR膜堆结构决定了它的端面反射率。正入射条件下,DBR的反射率是易于计算的。但是,

基金项目: 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ1402907)

作者简介: 卢静(1981-),女,副教授,博士研究生,现从事光通信与光放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: bluo@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2018-05-10; 收到修改稿日期: 2018-07-23

VC SOA 腔长很短,入射到 DBR 上的很大一部分光是不满足正入射条件的,这样正入射条件下计算出的 DBR 反射率必然有偏差。所以,考虑到 VC SOA 内部光场分布特点,本文将结合角谱理论和传输矩阵法来计算分析 VC SOA 中 DBR 的等效反射率。从 VC SOA 内部发出的光,入射到 DBR 上的角频谱近似服从高斯分布,首先采用传输矩阵法计算各个角频谱分量的等效反射系数,然后对反射的角频谱进行傅里叶逆变换得到反射光场分布。入射光场和反射光场一旦确定,就可以利用它们之间的耦合关系计算出等效反射率。

计算结果表明,与只考虑正入射情况相比,修正的 DBR 等效反射率小了 2% ~ 4%。对于激光器而言,因为制作时可以增加 DBR 膜堆的层数以确保高的反射率,降低器件阈值电流,所以正入射计算误差并未引起人们的重视。但是对于放大器而言,出发点不再是降低器件阈值电流,而需要根据不同应用需求,优化设计端面反射率的大小,这样,准确计算膜堆层数对 DBR 等效反射率的影响就成为前提条件,这正是作者工作的动机和出发点^[11-16]。

1 理论模型

1.1 反射率的计算

VC SOA 的微腔结构的形式是用高折射率层与有源区相邻,再接以低折射率层组成一个 HL 周期,两侧分别连接 m 个和 n 个周期,最后再接一个 H 层结束,形成 (HL) (HL) ... (HL) H 结构,这种结构简称为 HLH 结构^[17],如图 1 所示。

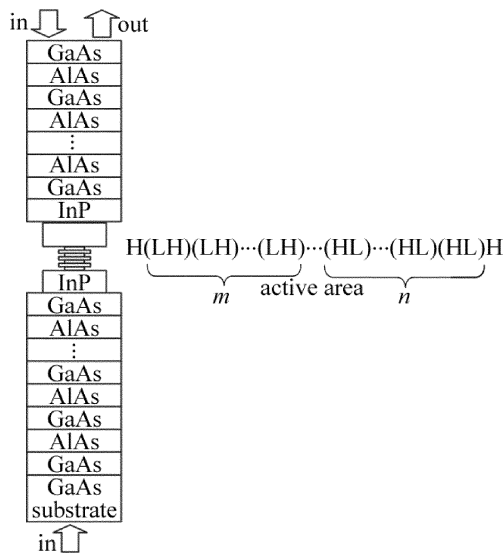


Fig. 1 Schematic diagram of VC SOA

根据光学薄膜原理,多层介质膜第 j 层的特征矩阵 M_j 为^[18]:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j}\sin\delta_j \\ i\eta_j\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 λ 是光波波长, d_j 为该层厚度, n_j 为该层折射率, θ_j 为入射角度, i 为虚数单位, $\delta_j = 2\pi/(\lambda n_j d_j \cos\theta_j)$, η_j 对于 p 偏振时为 $\eta_j = n_j/\cos\theta_j$, 对于 s 偏振是 $\eta_j = n_j \cos\theta_j$ 。本文中所用的薄膜厚度为 $1/4$ 波长,即 $d_j = \lambda/4$ 。整个 DBR 的传输矩阵 M 为:

$$M = (M_H M_L)^m M_H \quad (2)$$

式中 m 表示 DBR 结构周期。

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $k+1$ 层为衬底层, B 和 C 分别为膜层和基板的组合特征矩阵。

于是可以得到 DBR 多层介质膜的等效导纳 $Y = C/B$, 则膜系的 Fresnel 反射系数 r 和反射率 R 为:

$$r = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \quad (4)$$

$$R = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^* \quad (5)$$

式中, $*$ 表示共轭。利用这种方法,可以得到注入光的 DBR 等效反射率。

在 VC SOA 中有源腔内,光以一定的角度 θ_0 入射到 DBR 面上^[17],如图 2 所示。

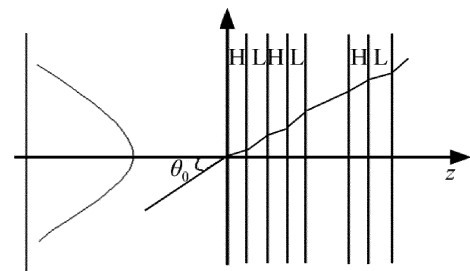


Fig. 2 Internal light field distribution map of VC SOAs

入射场角频谱 $F_i(s)$ 可以认为服从标准高斯分布:

$$F_i(s) = A \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{s}{\sigma_0} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中 A 为高斯函数的幅值, $s = \sin\theta_0$, θ_0 是入射角。该分布的半峰全宽 (full width at half maxima, FWHM) σ 定义为幅度降低一半时对应的 s , 即 $s_{FWHM} = \sqrt{2 \ln 2} \sigma_0 = 1.1774 \sigma_0$, σ_0 为正态分布的方差。则对应 θ_0 的 $\theta_{FWHM} = 2 \arcsin(s_{FWHM}) = 2 \arcsin(1.1774 \sigma_0)$ 。

对 (6) 式进行傅里叶逆变换,得到入射光场分布:

$$E_i(x) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sigma_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \sigma_0^2 x^2\right) \quad (7)$$

根据菲涅耳反射定律,反射场的角频谱 $F_{ref}(s)$ 为:

$$F_{ref}(s) = r(\theta_0) F_i(s) \quad (8)$$

式中 $r(\theta_0)$ 为菲涅耳反射系数。

对 $F_{ref}(s)$ 进行傅里叶逆变换,得到 $z=0$ 处的反射场 $E_{ref}(x)$ 。

反射场 $E_{ref}(x)$ 和入射场 $E_i(x)$ 相干叠加,耦合系数的平方的比就是反射率 $R^{[19-20]}$:

$$R = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_i(x) E_{ref}(x) dx \right|^2}{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_i^2(x) dx \right|^2} \quad (9)$$

1.2 半值谱宽 θ_{FWHM} 的判定

光波在 DBR 处被反射,同时一部分向自由空间输出,如图 3 所示。

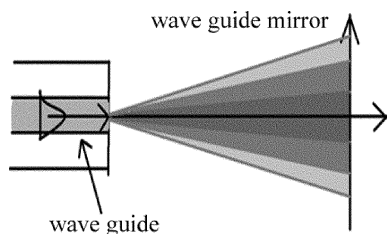


Fig. 3 Emission from the facet

输出光场的角频谱 $F_o(s)$ 为:

$$F_o(s) = t(\theta_0) F_i(s) \quad (10)$$

式中 $t(\theta_0)$ 为菲涅耳透射系数。

从参考文献 [16] 中知道,一般半导体激光器的出光孔径为 $2\mu\text{m} \sim 17\mu\text{m}$ 时,远场扩散角度的半值谱宽为 $30^\circ \sim 7^\circ$ 。而对于垂直腔激光放大器,出光孔径更小,为 $1\mu\text{m}$ 左右。远场扩散角的半值谱宽为 40° 左右。图 4 中给出了远场扩散角的半值谱宽为 38° 时的内外角频谱分布图,纵坐标为相对值。由点线模拟结果可以知道,此时腔内角频谱 $F_i(s)$ 的半值谱宽 $\theta_{FWHM} =$

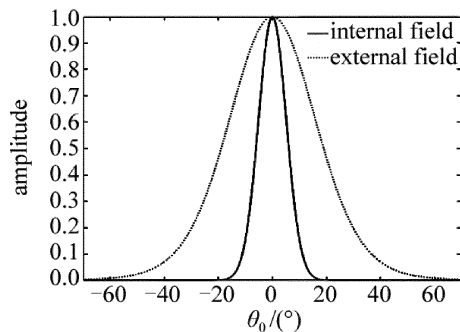


Fig. 4 Relationship between amplitude and the biased angle

12° , $\sigma_0 = 0.09$ 。拟合出来的结果与韩国公司生产的型号为 RayCan RC32xxx1-Fd 的光器件完全一致。

2 分析与计算

表 1 为各膜层折射率。图 5 中给出了在正入射的情况下,利用传输矩阵法计算出的 GaAs/AlAs 结构的 DBR 反射率随周期数变化曲线。从图中可以看出,随着 DBR 结构周期数的增加,腔反射率逐渐增加。VC SOA 的一个 DBR 作为出光面,既要保证有一定的腔反射率用于形成谐振,又要使激光波长有一定的腔透射率用于形成激光输出;而另一个面作为反射面,主要考虑增大反射率从而使腔内有更高的增益。所以一般 VC SOA 的双层 DBR 结构并不对称。当结构周期大于 25 时,中心激光波长处的反射率接近 1,并且基本已经不再随周期增大而改变,所以 VC SOA 反射面的 DBR 周期一般选取为 25 左右。而出光面的周期则既要考虑谐振,又要考虑激光波长,因而需要适当地选取。通常此类 VC SOA 产品出光面的 DBR 周期选为 13。

Table 1 Refractive index

VC SOA	refractive index
DBR(GaAs)	3.45
DBR(AlAs)	2.89
active area (InAs _{0.5} P _{0.5})	3.36
active area (In _{0.8} Ga _{0.2} P)	3.30
active area (InP)	3.17
base area (GaAs)	3.45

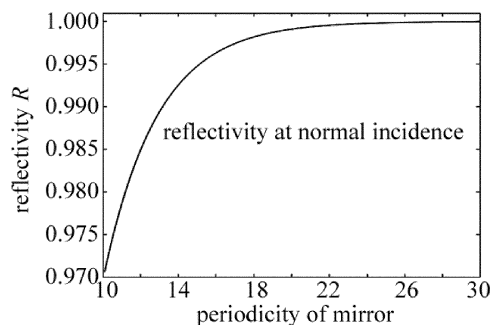


Fig. 5 Relationship between reflectivity and periodicity of DBR

图 6 中给出了考虑光场分布时,采用角频谱分析法计算出的反射率随着 DBR 结构周期的变化关系曲线。从计算结果可以看出,VC SOA 中 DBR 等效反射率和光场分布有一定的关系。在一定的光场分布下,等效反射率的变化趋势和正入射时利用传输矩阵法的结果是一致的。等效反射率都随着结构周期增加而增加,且当 DBR 结构周期大于 25 时基本不再增长。在以上的分析中,作者已经提到本文中 VC SOA 中入射到 DBR 上角频谱分布的半值谱宽 θ_{FWHM} 一般在 12° 左

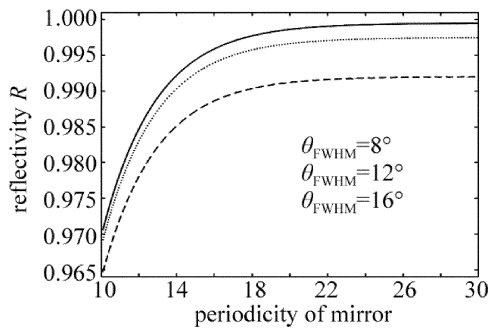


Fig. 6 Relationship between reflectivity and periodicity of DBR at different θ_{FWHM}

右。图 7 中给出了两者的对比情况。可以看出,当腔内角频谱分布的半值谱宽 θ_{FWHM} 为 12° 时,在同一结构周期下,VCSSOA 中 DBR 的等效反射率要比直接利用正入射的模型计算小 $2\% \sim 4\%$ 。这在分析 VCSSOA 工作特性时是至关重要的。图 6 中还给出了 θ_{FWHM} 为 8° 和 16° 时,等效反射率随结构周期的变化情况。

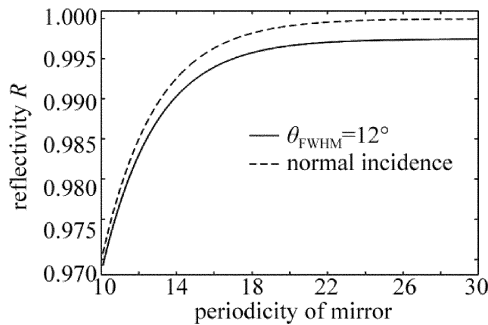


Fig. 7 Relationship between reflectivity and periodicity of DBR under $\theta_{FWHM} = 12^\circ$ and normal incidence

图 8 中给出了 DBR 等效反射率随光场分布的关系。在同一结构周期下,等效反射率在正入射 $\theta_{FWHM} = 0^\circ$ 时最大,并随着 θ_{FWHM} 变大而逐渐降低。从图中看出,当光场分布比较集中 ($\theta_{FWHM} < 8^\circ$) 时,等效反射率和正入射时相当。(结构周期为 13 时,等效反射率为 0.985)。此时的光相当于正入射到 DBR 上,光场失谐不大,对等效反射率影响较小。随着半值谱宽增加,入射场和反射场的失谐程度越大,等效反射率越低。考

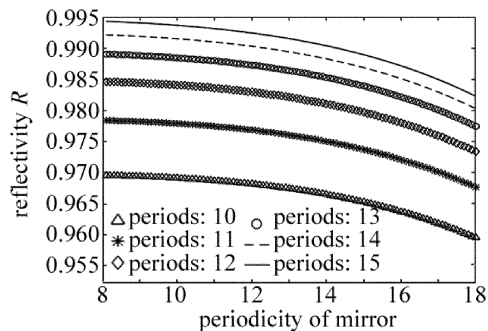


Fig. 8 Relationship between reflectivity and θ_{FWHM} at different periods of DBR

虑光场分布的影响后,同一结构周期的等效反射率降低了 $2\% \sim 4\%$ 。当周期为 13、且 $\theta_{FWHM} = 12^\circ$ 时,等效反射率 $R = 0.97$ 。当腔内光场分布更不集中的情况下,等效反射率更低。

3 结 论

本文中利用角频谱分析法,结合传输矩阵计算了 VCSSOA 中 DBR 的等效反射率。等效反射率随着结构周期增加而变大,但是当周期大于 25 时基本不再变化。分析了等效反射率和光场分布的关系。在同一结构周期下,考虑光场分布时的等效反射率和正入射变化趋势相同,但是要小 $2\% \sim 4\%$ 。等效反射率随着半值谱宽 θ_{FWHM} 增大而减小。这为准确计算膜堆层数对 DBR 等效反射率的影响提供了理论指导,可进一步优化 VCSSOA 的工作性能,例如降低阈值、优化增益带宽积等。

参 考 文 献

- [1] SAHRAEE E, ZARIFKAR A, SANAEI M. Improvement of gain recovery in QD-VCSSOA at 1Tb/s cross gain modulation using an additional light beam [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(10): 1-7.
- [2] QASAIMENH O. Novel tunable bistable quantum-dot vertical-cavity semiconductor optical amplifier [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14): 1553-1556.
- [3] PIPREK J, BJÖRLIN E S, BOWERS J E. Design and analysis of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 37(1): 127-134.
- [4] QASAIMENH O. Simple semi-analytical model for bistable cross-gain modulation in quantum dot VCSSOAs [J]. Optical & Quantum Electronics, 2017, 49(9): 309.
- [5] ADAMS M J, COLLINS J V, HENNING I D. Analysis of semiconductor laser optical amplifiers [J]. IEEE Proceedings, 2000, 132(1): 58-63.
- [6] IGA K. Vertical-cavity surface-emitting laser: Its conception and evolution [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2008, 47(1): 1-10.
- [7] SAHRAEE E, ZARIKAR A. MEMS-based tuning of InGaAs/GaAs quantum dot-VCSSOA [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2015, 51(5): 1-10.
- [8] QASAIMENH O. Cross-gain modulation in bistable quantum-dot VCSSOAs [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(3): 342-345.
- [9] LI B Zh, ZOU Y G. Tunable vertical cavity surface emitting lasers [J]. Laser Technology, 2018, 42(4): 556-561 (in Chinese).
- [10] MA Y N, LUO B, PAN W, et al. Improvement of slow light performance for vertical-cavity surface-emitting laser using coupled cavity structure [J]. Optoelectronics Letters, 2012, 8(6): 0405-0408.
- [11] LU J, LUO B, ZHOU G et al. Analysis of tune output property of vertical-cavity semiconductor optical amplifiers [J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 260-263 (in Chinese).

- [12] QIN Zh M , LUO B , PAN W. Theoretical analysis of the gain of vertical cavity semiconductor optical amplifier [J]. *Laser Technology* , 2006 , 30(5) : 452-454(in chinese) .
- [13] ZHANG W L , YU S F. Bistabilities of birefringent vertical-cavity semiconductor optical amplifiers with antiresonant reflecting optical waveguide [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics* , 2010 , 46 (1) : 11-18.
- [14] ZHANG Y , GUAN B O , TAM H Y. Characteristics of the distributed Bragg reflector fiber laser sensor for lateral force measurement [J]. *Optics Communications* , 2008 , 281(18) : 4619-4622.
- [15] MA Y N , LUO B , PAN W *et al.* Capability limitation for slow light using vertical-cavity surface-emitting laser amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* , 2013 , 25(10) : 903-906.
- [16] BJÖRLINS , RIOU B , KEATING A , *et al.* 1.3 μm vertical-cavity amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* , 2000 , 12(8) : 951-953.
- [17] ZHANG C Sh , ZHANG Y Sh , DU A F , *et al.* Analysis of reflectance characteristics of DBR in vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* , 2002 , 13(1) : 34-36(in Chinese) .
- [18] GAI H X , GUO X , DENG J , *et al.* Study of the optical characteristic of the vertical surface emitting laser using optical thin_film model [J]. *Optical Technique* , 2005 , 31(6) : 904-909(in Chinese)
- [19] DIAS N L , REDDY U , GARG A , *et al.* Wide stripe distributed bragg grating lasers with very narrow spectral linewidth [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics* , 2014 , 47(3) : 293-299.
- [20] ZIMMERMAN J W , PRICE R K , REDDY U , *et al.* Narrow linewidth surface-etched DBR laser: Fundamental design aspects and applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* , 2014 , 19(4) : 1503712.