

腔面反射率对超辐射发光二极管输出特性的影响*

马东阁 石家伟 刘明大 高鼎三

(吉林大学电子工程系,集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区,长春,130023)

摘要:本文用耦合速率方程,从理论上分析研究了超辐射发光二极管(SLD)的功率输出特性。主要讨论了腔面反射率对其功率输出特性的影响。研究结果表明,半导体激光器(LD)存在一最佳输出功率腔面反射率,随腔面反射率的降低,SLD的功率曲线斜率减小,输出功率降低,光谱调制深度减小。增大后腔面反射率可以提高SLD的输出功率,减小其工作电流。由于腔面反射率的降低,前后传输的光子在有源区内的分布的对称性发生了变化,表现为非均匀性,后向传输波大于前向传输波。最后,把理论计算结果同我们研制的 $1.3\mu\text{m}$ 涂层结构超辐射发光二极管的实验结果作了比较,得到了较好符合。

关键词:超辐射发光二极管 腔面反射率

Effect of facet reflectivity on the output characteristics of superluminescent diode

Ma Dongge, Shi Jiawei, Liu Mingda, Gao Dingsan

(Dept. of Electronic & Engineering of Jilin University,

Jilin Univ. Division of Integrated Optoelectronics Union Lab.)

Abstract: This paper demonstrates the relationship of the output characteristics and facet reflectivity of superluminescent diode (SLD), according to coupled rate equations. The theoretical calculations show that: (1) The semiconductor laser has a optimum point of output power facet reflectivity. For a SLD, with the decreasing of facet reflectivity, the power curve slope, maximum output power and spectral modulation depth decrease too. (2) Increasing of back facet reflectivity can increase the output power of SLD and reduce the operation current. (3) Because of the decreasing of the facet reflectivity, the nonuniform of carrier distribution is evident, the backward wave is obviously stronger than forward wave. Finally, as a comparison, the experimental study has been made. The experimental results are well in agreement with theoretical analysis.

Key words: superluminescent diode facet reflectivity

一、引言

超辐射发光二极管(SLD)是光纤陀螺和光时域反射仪的理想光源^[1],它是具有内增益的非相干光电器件。目前,许多结构 SLD 已被研制出来^[2,3,4,5]。涂层结构 SLD 是 SLD 的主要结构之一,它通常是在半导体激光器的输出腔面上蒸镀减反射涂层实现的。涂层腔面反射率必须满足一定条件才能实现超辐射输出而不产生受激振荡。因此,涂层腔面反射率对 SLD 的输出特性有重要影响。

* 国家教委博士点基金项目资助。

关于涂层结构 SLD 的实验研究已有许多报导^[6,7,8,9], N. K. Dutta 等人^[6]在假设涂层腔面反射率 $R_1 = 0$ 的条件下, 对涂层结构 SLD 进行了理论研究, 重点研究了温度特性, 计算没有考虑增益饱和效应。本文用耦合速率方程, 在考虑增益饱和和热效应的情况下, 从理论上分析研究了腔面反射率对 SLD 输出特性的影响, 通过模拟计算不同腔面反射率的输出光功率、光谱调制深度及前后向传输的光子在有源区内分布的变化, 得出了一些规律性结果。理论和实验结果符合表明, 该模型可较好地描述 SLD 的输出特性, 可用于 SLD 设计。

二、理 论 模 型

对涂层结构 SLD, 如图 1 所示结构。在稳态条件下, 沿正方向耦合速率方程为^[10]:

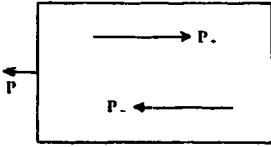


Fig. 1 SLD structure

$$\frac{dP_+}{dz} = GP_+ + P_s \quad (1)$$

$$\frac{dP_-}{dz} = -(GP_- + P_s) \quad (2)$$

$$P_s = \Gamma\beta N/2C\tau_s$$

式中, P_+ 和 P_- 分别是前向和后向传输光子浓度(它正比于光强), C 是波导模式的群速度, G 是净增益, Γ 是限制因子, β 是自发发射因子, τ_s 是自发发射载流子寿命, P_s 是自发发射光子浓度, N 是少数载流子浓度, z 是沿有源介质的距离($z=0$ 是 SLD 的输出端)。

(1)式和(2)式满足下面边界条件:

$$P_+(0) = R_1 P_-(0) \quad (3)$$

$$P_-(L) = R_2 P_+(L) \quad (4)$$

对(1)式和(2)式积分, 再由边界条件(3)式和(4)式, 可得到两输出腔面处前、后传输的光子浓度分别为:

$$P_+(0) = \frac{R_1 P_s (e^{GL} - 1)(1 + R_2 e^{GL})}{G(1 - R_1 R_2 e^{2GL})} \quad (5)$$

$$P_+(L) = \frac{P_s (e^{GL} - 1)(1 + R_1 e^{GL})}{G(1 - R_1 R_2 e^{2GL})} \quad (6)$$

$$P_-(0) = \frac{P_s (e^{GL} - 1)(1 + R_2 e^{GL})}{G(1 - R_1 R_2 e^{2GL})} \quad (7)$$

$$P_-(L) = \frac{R_2 P_s (e^{GL} - 1)(1 + R_1 e^{GL})}{G(1 - R_1 R_2 e^{2GL})} \quad (8)$$

由此可以求出涂层腔面和后腔面的输出光功率分别为:

$$\begin{aligned} P_1 &= CEWd/\Gamma(1 - R_1)P_-(0) \\ &= CEWd/\Gamma(1 - R_1) \frac{P_s (e^{GL} - 1)(1 + R_2 e^{GL})}{G(1 - R_1 R_2 e^{2GL})} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= CEWd/\Gamma(1 - R_2)P_+(L) \\ &= CEWd/\Gamma(1 - R_2) \frac{P_s (e^{GL} - 1)(1 + R_1 e^{GL})}{G(1 - R_1 R_2 e^{2GL})} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, E 是光子能量, W 是有源区宽度, d 是有源层厚度。

由(9)和(10)两式可得:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{1 - R_1}{1 - R_2} \cdot \frac{(1 + R_2 e^{GL})}{(1 + R_1 e^{GL})} \quad (11)$$

上式即描述了 SLD 前、后腔面输出功率之间的关系。可以看到,当两腔面反射率相等时, $R_1 = R_2$, 前、后两端输出功率曲线具有对称性,一旦反射率的对称性受到破坏,则功率输出特性就表现出很大差异,其特征是大部分光功率将从低反射率腔面输出。

$$\text{光谱调制深度可表示为}^{[6]}: m = \frac{2|a|}{1 + |a|^2} \quad (12)$$

式中, $a = (R_1 R_2)^{1/2} e^{2j\beta L} e^{GL}$ 为放大因子。

类似于半导体激光器,对 SLD, 少数载流子浓度 N 和注入电流密度 J , 光子浓度 P_{\pm} 满足下述速率方程:

$$\frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - CA(N - N_0)(P_+ + P_-) = 0 \quad (13)$$

式中, N_0 是透明载流子浓度,与温度有关($\propto T^{3/2}$), A 是增益常数,是温度函数($\propto 1/T$), e 是电子电荷。

设峰值光增益与载流子浓度成线性关系^[11]:

$$g_0 = A(N - N_0) \quad (14)$$

$$\text{则净增益为: } G = \Gamma g_0 - \alpha = \Gamma A(N - N_0) - \alpha \quad (\alpha \text{ 为损耗}) \quad (15)$$

由(13)式,第三项为增益饱和项,在低的光子浓度下((11)式中 $P_+ + P_- = 0$),增益的非饱和形式为:

$$G_0 = \tau_s \Gamma A (J/ed - N_0/\tau_s) - \alpha \quad (16)$$

$$\text{在高光子浓度下,饱和增益为: } G = G_0/[1 + CA\tau_s(P_+ + P_-)] \quad (17)$$

当有源层内注入电流时,引起结温升,在计算中,我们对结温升作如下考虑:

$$\Delta T = [(V_j + IR_s)I - P]R_{th} \quad (18)$$

式中, I 是注入电流, R_s 是串联电阻, V_j 是工作电压, R_{th} 是热阻。

依据上述分析,可计算出 SLD 的输出特性随腔面反射率的变化,计算中各参量取值如附表所示。

三、结果与讨论

对不同前腔面反射率 R_1 ,计算的前腔面和后腔面输出功率与注入电流之间的关系曲线(即 $P-I$ 曲线)如图 2

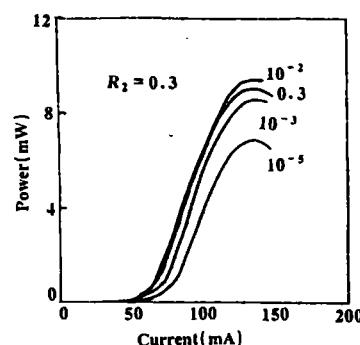


Fig. 2 Front facet $P-I$ curve at different R_1

Table Summary of calculation parameters	
W	active width
d	active thickness
L	cavity length
β	spontaneous emission factor
Γ	confinement factor
C	group velocity
τ_s	spontaneous emission lifetime of carriers
E	photon energy
e	electronic charge
A	gain constant
N_0	transparency carriers density
V_j	operation volt
R_s	series resistance
R_{th}	thermal resistance
α	loses

和图 3 所示。可以看到,由于腔面反射率 R_1 的降低,前腔面和后腔面功率输出特性表现出了很大差异,对前腔面输出, $P-I$ 曲线斜率和最大输出功率经历了一个由小变大,再由大变小的过程,正如图 4 所示,给出了不同前腔面反射率 R_1 对应的最佳输出功率曲线, $R_1 = 0.3$ 时

的输出功率并不是最大,对我们计算所取参数, $R_1 \approx 0.1$ 为最佳反射率,这表明,对于 LD 功率输出,其自然解理面反射率并不是最佳反射率,适当减小输出腔面反射率可以提高 LD 的输出功率。因此,LD 存在一最佳输出功率

腔面反射率,而后,随腔面反射率 R_1 不断减小,由于腔面损耗增大, $P-I$ 曲线的斜率和最大输出功率又开始减小,这时,曲线开始呈现无“阈值”特性,表现了放大的自发发射的超辐射特性,器件变成了超辐射发光二极管。还可以看到,腔面反射率 R_1 的降低,不但影响器件输出功率的变化,也改变了其最小工作电流,最小工作电流随 R_1 的减小而单调增大。对后腔面输出, $P-I$ 曲线斜率和最大输出功率则随反射率 R_1 的减小而单调减小。和前腔面 $P-I$ 曲线的变化完全不同,并且后腔面输出功率小于前腔面输出功率,如图 2 和图 3 中的曲线所示, $R_1 = R_2 = 0.3$ 时的两条曲线完全相同,由此可知,腔面反射率的降低,改变了前、后端面输出功率曲线的

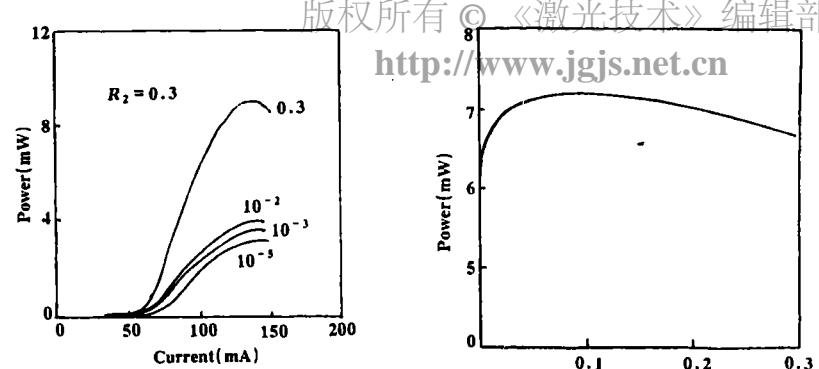


Fig. 3 Back facet $P-I$ curve at different R_1

Fig. 4 $P-R_1$ curve

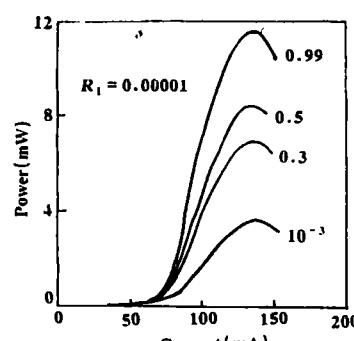


Fig. 5 Front facet $P-I$ curve at different R_2

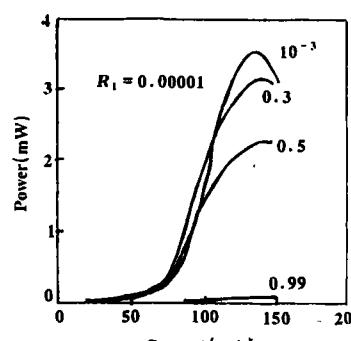


Fig. 6 Back facet $P-I$ curve at different R_2

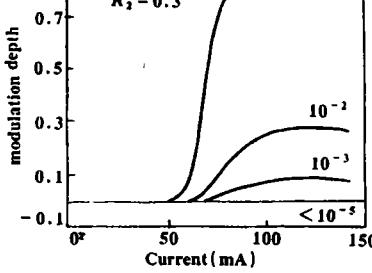


Fig. 7 $M-I$ curve at different R_1

对称性,大部分功率将从低反射率腔面输出。

对 SLD,当保持 $R_1 = 10^{-5}$ 不变时,不同后腔面反射率 R_2 的前、后腔面的 $P-I$ 曲线如图 5 和图 6 所示。可以看到,随着后腔面反射率 R_2 增大,可以提高前腔面功率输出,如图 5 中 $R_2 = 0.99$ 的曲线的最大输出功率大约是 $R_2 = 0.3$ 的曲线的最大输出功率的两倍。同时,最小工作电流也有所降低,而后腔面输出功率随后腔面反射率 R_2 的增大而减小,如图 6 所示,当 $R_2 = 0.99$ 时,后腔面输出功率几乎等于零。这时,光功率只从前腔面输出。因此,增大后腔面反射率,是提高 SLD 输出功率的一种有效方法,同时也可降低其最小工作电流。

光谱调制深度是 SLD 的重要参量,对 SLD 来说,光谱调制深度越小越好,这就需要有足够低的腔面反射率。如图 7 所示给出了在不同腔面反射率 R_1 下,光谱调制

深度随注入电流的变化曲线,这时后腔面反射率 $R_2=0.3$ 保持不变。清楚地看到,在注入电流下,腔面反射率 R_1 越小,光谱调制深度越小。当注入电流小于“阈值”电流时,光谱调制深度等于 0,这是自发发射光,当注入电流达到“阈值”

电流时,对 LD, $R_1=0.3$, 光谱调制深度随注入电流迅速增大,并趋于一恒定值,而腔面反射率较小时,随注入电流增加,光谱调制深度缓慢增大。例如 $R_1 < 10^{-3}$, 在整个注入电流范围内,光谱调制深度小于 10%,这是超辐射发光。对给定腔面反射率 R_1 , 随注入电流增加,光谱调制深度增大,这是由于随注入电流增加,发射光中的受激发射增强的结果。因此,要制造在大注入电流范围内光谱调制深度小的 SLD, 必须减小输出腔面反射率,而腔面反射率的减小,又降低了输出功率。所以,提高输出

功率和减小光谱调制深度是相互矛盾的,在满足实现 SLD 的条件下,即要提高 SLD 的输出功率,又要适当地减小其光谱调制深度,如图 8 所示为在不同腔面反射率下,光谱调制深度对应

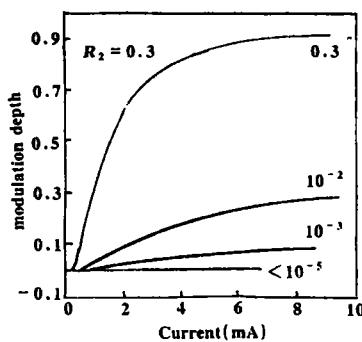


Fig. 8 M-P curve at different R_1

的最佳输出功率。

腔面反射率的降低,改变了前后传输的光子在有源区内的分布。如图 9 所示前

后传输光子在

有源区内的分布曲线, a: $R_1=R_2=0.3$ 为 LD, b: $R_1=10^{-5}, R_2=0.3$ 为 SLD。可以看到, $R_1=R_2=0.3$ 的前向和后向传输的光子在有源区内的分布是对称的。而减小腔面反射率,如 $R_1=10^{-5}, R_2=0.3$, 前、后传输的光子在有源区内的分布的对称性发生了变化,表现出了非均匀性,后向传输波大于前向传输波,正如图 9b 所示。

四、器件制备以及和理论比较

如前所述,腔面反射率的变化导致了器件输出特性的重要改变。

我们通过在 LD 的输出腔面上蒸镀 SiO 单层减反射涂层来改变其腔面反射率,通常,涂层反射率是涂层折射率和涂层厚度的函数,要满足实现 SLD 的要求,必须同时控制好涂层折射率和涂层厚度两个参数。

我们用 SiO 作蒸发源,采用电子束蒸发和热蒸发,由于 SiO 在蒸发时要与真空室中的余氧反应生成 SiO_2 ,从而使涂层的折射率降低,因此,控制蒸发时的真空度就可以达到控制涂层折射率的目的,我们用 IL-400 型膜厚速率控制仪来监测涂层厚度,这样,我们得到了高质量的减

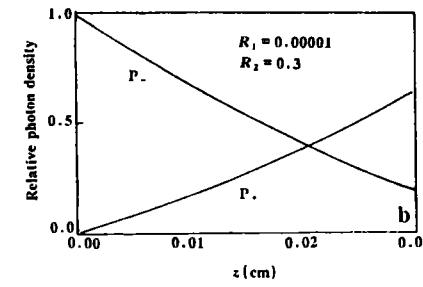


Fig. 9 Distribution of forward and backward propagating photons inside active region
a— $R_1=R_2=0.3$ b— $R_1=10^{-5}, R_2=0.3$

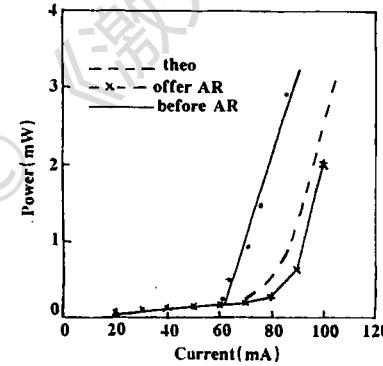


Fig. 10 P-I curves before and after coating and theoretically calculated

反射涂层。

对我们制作 SLD 的 J# 号器件, 蒸镀前后器件的 P-I 如图 10 所示, 可以看到, 蒸镀涂层后的 SLD 的 P-I 曲线已无明显的阈值拐点, 表现了超线性特性, 其工作电流明显高于原激光器的工作电流, 蒸镀前后器件的发射光谱如图 11 所示, a 为蒸镀前 LD 的发射光谱, 是很好的单纵模受激发射光谱; b 为蒸镀后 70mA, 80mA, 90mA, 注入电流下的 SLD 的发射光谱, 谱宽大于 30nm, 远大于原激光器的谱宽, 可以看到, 由于减反射涂层的蒸镀, 使器件的输出特性发生了根本的变化, 对我们蒸镀的 J# 号器件, 根据文献[6]估算我们蒸镀的涂层的剩余反射率 R_1 为 2.13×10^{-4} , 代入理论计算公式(9), 则理论计算的 P-I 曲线如图 10 中的虚线所示, 和实验结果有较好的符合。

五、结 论

本文用耦合速率方程, 考虑了增益饱和和热效应, 很好地模拟了涂层结构超辐射发光二极管的输出特性, 理论分析表明, 器件输出功率特性与腔面反射率密切相关。降低腔面反射率可以提高 LD 的输出功率, 对 SLD 由于腔面反射率的降低消除了 F-P 振荡, 使 P-I 特性表现了无“阈值”特性, 腔面损耗的增大降低了 SLD 的输出功率, 而腔面反射率的降低减小了 SLD 的光谱调制深度。在满足实现 SLD 的条件下, 增大后腔面反射率, 可以把 SLD 的输出功率提高近两倍, 同时减小了它的最小工作电流。由于腔面反射率的减小使前向、后向传输的光子在有源区内的分布发生了变化, 后向传输波大于前向传输波。理论和实验结果有较好的符合, 表明由该理论所得出的一些重要结果, 对实际制造涂层结构 SLD 和研究它的输出特性是非常有用的。

参 考 文 献

- 1 Burns W K, Chen C L, Moeller R P. J Lightwave Technol, 1983; LT-1(1): 98~105
- 2 Lin C F. Electron Lett, 1991; 27: 968~970
- 3 Semenov A T, Shidlovski V R, Safin S A. Electron Lett, 1993; 29: 854~856
- 4 Kashima Y, Kobayashi M, Takano H. Electron Lett, 1988; 24: 1507~1508
- 5 Nagai H, Noguchi Y, Sudo S. APL, 1989; 54: 1719~1721
- 6 Kaminow I P, Eisenstein G, Stulz L W. IEEE J Q E, 1983; 19(4): 493~495
- 7 Kaminow I P, Eisenstein G, Stulz L W. IEEE J Q E, 1983; 19: 78
- 8 Eisenstein G, Stulz L W. Appl Opt, 1984; 23: 161
- 9 Paoli T L, Thornton R L, Burnham R D. APL, 1985; 47: 450
- 10 Dutta N K, Nelson R J, Wright P D et al. IEEE Trans Electron Devices, 1983; 30(4): 360~363
- 11 Choi H K, Chen K L, Wang S. IEEE J Q E, 1984; 20: 385~393

* * * * *

作者简介: 马东阁, 男, 1967 年出生。博士。现主要从事半导体激光器和超辐射发光二极管的结构设计、制备和光学特性研究。

收稿日期: 1995-01-23 收到修改稿日期: 1995-09-21

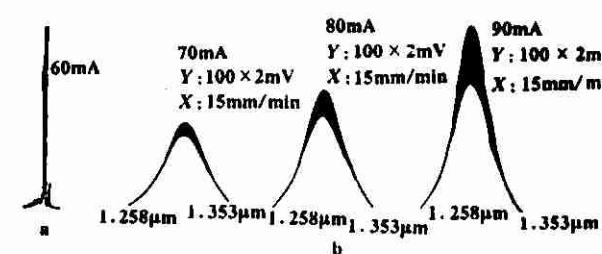


Fig. 11 The emission spectra before and after coating