

半导体激光器功率输出特性的理论分析及实验研究

刘德明 黄德修 黄菊仙

(华中理工大学, 武汉, 430074)

1991年5月21日收到, 同年10月8日修改定稿

本文从理论上及实验上分析研究了半导体激光器(LD)功率输出特性与其腔面反射率之间的关系。研究表明, 通过改变LD腔面反射率, 可以使其输出功率增大, 也可以使其转变为新的光电器件, 如超辐射发光二极管(SLD)或行波半导体激光放大器(TW-SLA)等等。在大量实验数据的基础之上建立了LD输出功率曲线阈值与腔面反射率关系的经验公式, 确定了LD最佳输出功率腔面反射率以及SLD和TW-SLA的工作条件。

EEACC: 4320J, 4190F, 6260

一、前言

作为半导体激光器的基本结构, 其谐振腔由其芯片本身的自然解理构成平行平面腔, 腔面反射率由芯片材料的折射率确定, 对常用的LD, 腔面反射率为0.31—0.32。理论与实验研究表明, 芯片解理面剩余反射率的改变将导致半导体激光器输出特性的重大变化。例如可以提高其受激辐射强度而增加其输出功率; 或增强其自发辐射功率使之成为SLD; 或消除其谐振腔效应使之成为TW-SLA; 也可以突出DFB器件的光栅反馈作用, 使其成品率大大提高; 还可以使QW器件的性能得到很大改善。

本文以LD器件为研究对象, 通过分析光子在谐振腔内的振荡以及在腔面的输出特点来建立LD的功率输出方程式, 进而分析了LD功率输出特性与其芯片解理面反射率之间的关系。同时, 结合TW-SLA的研制工作, 在大量数据分析的基础上, 从实验上对LD到TW-SLA变化过程中功率输出特性作了进一步的研究。

我们的研究表明, LD的功率输出特性(即 $P-I$ 曲线)在不同的端面反射率下具有完全不同的特征。可以通过腔面反射率的设计来改变LD特性使之成为不同种类或高性能的器件。

二、LD功率输出特性

我们所研究的器件其芯片具有隐埋型异质结构(即BHLD), 芯片安装在铜热沉上, 其谐振腔面反射率分别为 R_1 和 R_2 , 从前后两个腔面的输出功率分别为 P_1 和 P_2 , 如

图 1 所示。

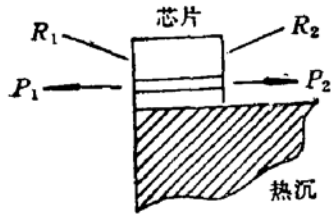


图 1 芯片结构

LD 的功率输出特性与其腔面反射率有着密切的联系。这里，我们来分析光子在谐振腔内的振荡及从腔面输出的过程。为不失一般性，假定在谐振腔中部因自发辐射产生沿相反方向传播的两列光波，初始光功率均为 P_0 ，则这两列光波将在腔内多次振荡放大，并从前、后腔面输出，光功率 P_1 和 P_2 为：

$$P_1 = \sqrt{G_r} P_0 (1 - R_1) (1 + R_2 G_r) / (1 - R_1 R_2 G_r^2), \quad (1)$$

$$P_2 = \sqrt{G_r} P_0 (1 - R_2) (1 + R_1 G_r) / (1 - R_1 R_2 G_r^2), \quad (2)$$

这里， P_1 和 P_2 均包含了沿相反方向传播的两列光波的贡献。 G_r 是腔内单程净增益：

$$G_r = \exp[(g - \alpha)L], \quad (3)$$

式中 g , α 与 L 分别是腔内增益与吸收系数以及腔长。

由(1),(2)两式可得：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{1 - R_1}{1 - R_2} \cdot \frac{1 + R_2 G_r}{1 + R_1 G_r}, \quad (4)$$

上式即描述了 LD 前、后腔面输出功率之间的关系。LD 输出功率与注入电流之间的关系曲线（即 $P-I$ 曲线）具有阈值特性，当电流 I 低于阈值电流 I_{th} 时，功率 P 很小；当 $I > I_{th}$ 时， P 随 I 线性变化，而 $P-I$ 曲线的斜率则近似不变。因此， $P-I$ 曲线斜率是描述 LD 功率输出特性的重要参数。由芯片前、后腔面输出 P_1-I 和 P_2-I 曲线的斜率定义为：

$$\eta_1 = \frac{P_1 - P_{th1}}{I - I_{th}} \approx \frac{P_1}{I - I_{th}}, \quad (P_{th1} \ll P_1) \quad (5)$$

$$\eta_2 = \frac{P_2 - P_{th2}}{I - I_{th}} \approx \frac{P_2}{I - I_{th}}, \quad (P_{th2} \ll P_2) \quad (6)$$

其中 P_{th1} 和 P_{th2} 为阈值功率。

利用(5)、(6)式可将(4)式改写为：

$$\eta_1 / \eta_2 = \frac{(1 - R_1)(1 + R_2 G_r)}{(1 - R_2)(1 + R_1 G_r)}. \quad (7)$$

由于在 $I \geq I_{th}$ 时，有 $g \approx \alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}$ ，即 $G_r \approx \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}$ ，上式可简化为：

$$\eta_c = \eta_1 / \eta_2 = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \cdot \frac{1 - R_1}{1 - R_2}. \quad (8)$$

在一般情况下，有 $R_1 = R_2$ ， $\eta_c = 1$ 。

另一方面，如果考虑 LD 总功率输出，其功率曲线斜率 η_D 定义为：

$$\eta_D = \frac{(P - P_{th})}{(I - I_{th})} \approx \frac{P}{(I - I_{th})} \quad (P_{th} \ll P), \quad (9)$$

式中 P_{th} 是阈值电流 I_{th} 对应的总阈值光功率； P 是 LD 双端输出总功率， $P = P_1 + P_2$ ，显然，应有如下关系式成立：

$$\eta_D = \eta_1 + \eta_2. \quad (10)$$

由(8)、(10)两式即可得到描述 LD 双端功率输出特性的方程式: (11)

$$\eta_1 = \eta_c \eta_D / (1 + \eta_c), \quad (12)$$

$$\eta_2 = \eta_D / (1 + \eta_c).$$

上述式子中, η_c 反映了 LD 前、后腔面功率输出分配比, 它只由两腔面反射率决定, 而描述 LD 总功率输出特性的 η_D 也和腔面反射率有关, 由下式给出^[1]:

$$\eta_D = \eta_i \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} / \left(\alpha L + \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right), \quad (13)$$

其中 η_i 是 LD 的内量子效率, 一般在小信号增益下其值约为 0.7 左右. 但在 R_1 较小从而导致驱动电流较大时, 由于受增益饱和效应的影响, η_i 将减小. 这时, 根据 η_i 的定义式与饱和增益表达式^[2], 可导出如下关系式:

$$\eta_i \propto g_0 L - \left(\alpha L + \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right). \quad (14)$$

利用上式可将(13)式写为:

$$\eta_D = \eta_0 \frac{\left[g_0 L - \left(\alpha L + \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right] \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}}{\alpha L + \ln \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}}, \quad (15)$$

式中 η_0 为比例常数, g_0 为未饱和增益系数.

(8)、(15)与(11)、(12)式即确定了 LD 功率输出特性与芯片解理面之间的变化关系. 依据上述公式可作以下理论分析:

1. 从公式(8)可知, 当 LD 两端面反射率相等, 即 $R_1 = R_2$ 时, LD 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.

2. 从公式(15)可知, 当 $\sqrt{R_1 R_2} \rightarrow 1$ 或 $\sqrt{R_1 R_2} \rightarrow e^{-(g_0 - \alpha)L}$ 时, 均有 $\eta_D \rightarrow 0$, 这表明 η_D 存在有最大值. 令 η_D 对 $\sqrt{R_1 R_2}$ 的导数等于 0, 可求得极大值条件为:

$$(\sqrt{R_1 R_2})_m = e^{-\alpha L (\sqrt{g_0 / \alpha} - 1)}. \quad (16)$$

上式表明 LD 最佳功率输出腔面反射率与 LD 芯片增益系数 g_0 , 损耗系数 α 及腔长 L 有关. 若取 $\alpha = 20 \text{ cm}^{-1}$, $g_0 = 180 \text{ cm}^{-1}$, $L = 0.03 \text{ cm}$. 则可求得 $(\sqrt{R_1 R_2})_m$ 为 0.30; 当 $g_0 = 240 \text{ cm}^{-1}$ 时, $(\sqrt{R_1 R_2})_m$ 为 0.23. g_0 越大则所要求的最佳反射率就越低.

3. 公式(11)与(12)所反映的 η_1 及 η_2 与腔面反射率的关系比较复杂. 为此进行了数值计算分析. 计算结果如表 1 所示. 可以看到, 当 $R_2 = 0.31$ 时, 随着 R_1 的降低, η_2 单调减小; η_1 则先增大, 至某一最大值即也开始减小. 因此, η_1 也对应着一最佳腔面反射率, 当 $g_0 = 180 \text{ cm}^{-1}$, $\alpha = 20 \text{ cm}^{-1}$, $L = 0.03 \text{ cm}$ 时, 最佳腔面反射率 $R_{1m} = 0.05$.

4. 当后腔面反射率 $R_2 \rightarrow 1$ 时, $\eta_c \rightarrow \infty$, $\eta_2 \rightarrow 0$ 这时, 光功率只从前腔面输出. 最佳腔面反射率可由(16)式导出:

$$R_m = e^{-2\alpha L (\sqrt{g_0 / \alpha} - 1)}. \quad (17)$$

仍取上述典型数据,若 $R_2 > 0.91$, 则最大功率输出所要求的前腔面反射率为 $R_{1m} = 0.10$, 这时 LD 的功率曲线斜率可增加近一倍。

表 1

$R_1 \backslash R_2$	0.91			0.31			0.01		
	η_1	η_2	η_D	η_1	η_2	η_D	η_1	η_2	η_D
0.01	0.81	0.01	0.81	0.59	0.07	0.66	0.04	0.04	0.07
0.05	0.96	0.02	0.98	0.68	0.20	0.88	0.11	0.25	0.36
0.07	0.97	0.03	0.99	0.68	0.24	0.92	0.11	0.31	0.42
0.09	0.97	0.03	1.00	0.67	0.27	0.94	0.11	0.35	0.46
0.16	0.94	0.04	0.99	0.62	0.36	0.98	0.10	0.46	0.56
0.22	0.90	0.05	0.95	0.57	0.43	1.00	0.09	0.52	0.61
0.29	0.85	0.06	0.91	0.52	0.48	1.00	0.08	0.57	0.65
0.31	0.83	0.06	0.89	0.50	0.50	1.00	0.07	0.59	0.66
0.38	0.76	0.07	0.84	0.45	0.55	1.00	0.06	0.63	0.69
0.48	0.66	0.08	0.75	0.37	0.67	0.98	0.05	0.67	0.72
0.64	0.48	0.10	0.59	0.25	0.70	0.95	0.03	0.73	0.77
备注	1. 计算参数: $\alpha = 20\text{cm}^{-1}$; $g_0 = 180\text{cm}^{-1}$; $L = 300\mu\text{m}$; 2. 各斜率值已归一化。								

三、实验装置

如前所述, LD 芯片解理面反射率的变化导致其功率输出特性的重要改变。

我们通过在 LD 芯片解理面上制备光学薄膜来使其反射率变化。其中,降低反射率通过蒸镀 SiO_2 变折射率抗反膜来实现。由于蒸镀速率较低,因此可精确地控制膜厚,进而控制剩余反射率使其在 31%—0.05% 之间可任意选择;反射率的提高则是通过镀制 GaF_3/Si 四层介质增反膜来实现的,其反射率可达 90% 以上。

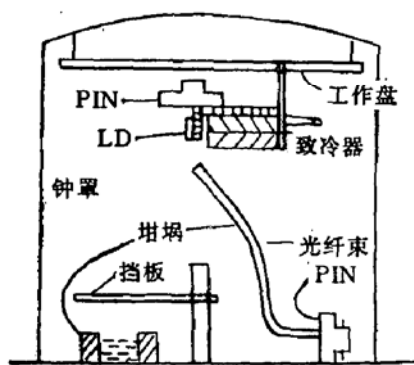


图 2 实验装置

为了能够同时测量反射率输出功率曲线,我们设计了如图 2 所示的实验装置。在高真空钟罩内,将 LD 芯片待镀膜面朝下置于工件盘托架上,在 LD 上加驱动电流使之发光,利用两只 PIN 光电探测器分别接收自 LD 两端输出的光功率。为保证光功率测试的稳定性和重复性,利用半导体致冷器来进行精密温度控制。

实验时,采用电子束加热坩埚中的膜料使之蒸发,打开挡板之后,蒸发的膜料即在 LD 芯片解理面上淀积形成光学薄膜,导致反射率发生变化。当反射率达到预定测试值时即刻关闭挡板和电子枪,停止蒸镀。待稍稍稳定之后,即可测试该反射率对应的 $P-I$ 曲线。

由于整个实验是在同一条件下连续进行,这就保证了试验数据的可比性与可靠性。

四、实验结果与数据分析

我们对数十只 LD 芯片进行了镀制抗反膜与增反膜的实验,在不同的反射率下测试了功率输出特性。

对于一般的 LD, 镀光学膜之前, 芯片两端面反射率为 $R_1 = R_2 = 0.31$, 其两端输出功率曲线 P_1-I 和 P_2-I 应是一致的。如图 3 和图 4 中的曲线 a 所示其阈值电流 $I_{th_0} = 30\text{mA}$, 阈值以上部分斜率为 $\eta_1 = \eta_2 = 0.086\text{mW/mA}$, 最大功率输出为 11.5mW 。

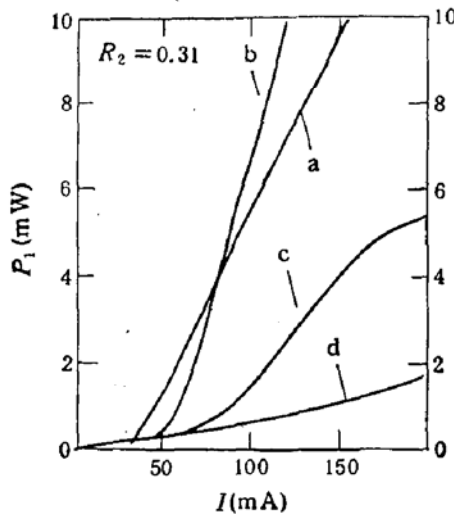


图 3 前端面输出功率曲线

a) $R_1 = 0.31\%$; b) $R_1 = 2\%$
c) $R_1 = 0.8\%$; d) $R_1 = 6 \times 10^{-4}$

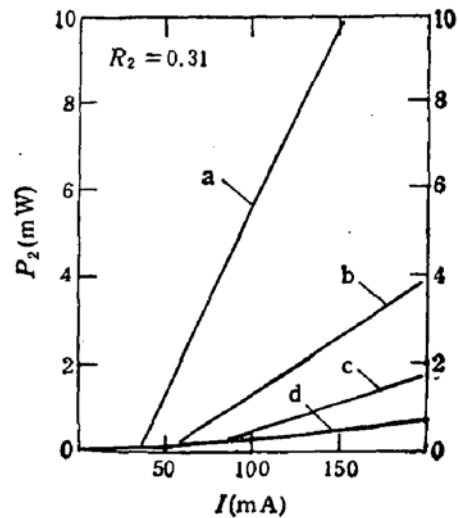


图 4 后端面输出功率曲线

a) $R_1 = 0.31\%$; b) $R_1 = 2\%$
c) $R_1 = 0.8\%$; d) $R_1 = 6 \times 10^{-4}$

当保持 R_2 不变, 镀抗反膜使 R_1 减小, 测得的 LD 前、后两端输出 P_1-I 和 P_2-I 曲线随 R_1 的变化如图 3 和图 4 中的曲线 b、c、d 所示。我们看到, 两者的变化过程有很大差异: P_2-I 斜率单调降低而 P_1-I 斜率则经历了一个由小变大, 再由大变小的过程。这与前文理论分析结果相一致。

在 $R_1 \approx 2\%$ 时, P_1-I 斜率达到最大, 为 0.152mW/mA , 最大功率输出增大至 23.8mW 。

当 $R_1 = 0.8\%$ 时, 曲线开始呈现软阈值特性, 光功率输出的自发辐射成份加重而演变成超辐射输出, 并由此可得到超辐射发光二极管 (SLD)。

当 $R_1 < 10^{-3}$ 之后, P_1-I 曲线开始趋近于线性直线。这时曲线的阈值特性逐渐消失, 器件成为单端耦合的行波半导体激光放大器^[3]。

若在芯片后端面也镀制抗反膜, 使 R_2 降低则 P_1-I 曲线斜率下降而 P_2-I 曲线上升。当 $R_2 = R_1$ 时, 两条曲线重新趋于一致, 如图 5 所示。这时, 芯片成为两端分别耦合输入输出的行波半导体激光放大器^[4]。

当保持 $R_1 = 0.31$ 不变, 而使后腔面反射率 R_2 增大时, 也使得前腔面功率输出增加。图 6 示出了保持 $R_1 = 0.31$, 使 $R_2 > 90\%$ 时, 芯片两端输出功率曲线。从前端面输出的功率曲线斜率相对于原曲线斜率提高了近一倍。同时, 阈值电流也有所降低。

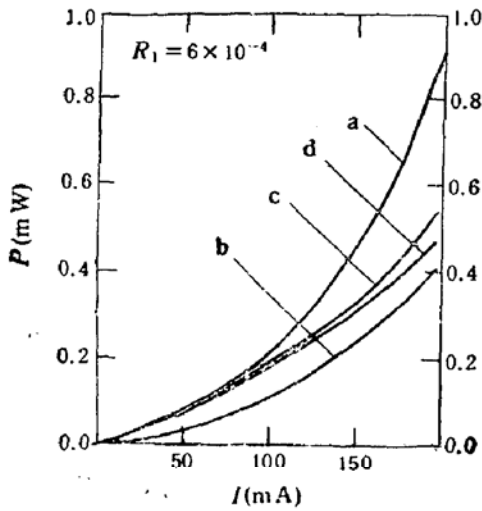


图 5 后端面反射率的影响

- a) 镀膜前前端面输出 b) 镀膜前后端面输出
c) 镀膜后前端面输出 d) 镀膜后后端面输出

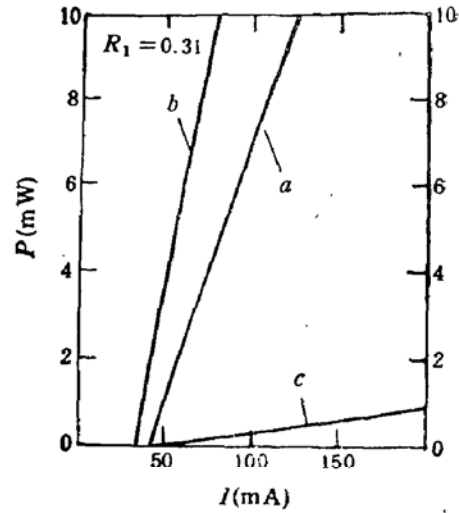


图 6 后端面增反膜的影响

- a) 镀膜前功率输出 b) 镀膜后前端面功率输出
c) 镀膜后后端面功率输出

实验结果还表明,在 $P-I$ 曲线斜率随腔面反射率变化的同时,曲线的阈值电流 I_{th} 也随之改变.在 $R_1 \neq R_2$ 时,芯片前、后两端面输出 $P-I$ 曲线的斜率不相同,然而两者的阈值电流却是相同的.阈值电流随着 R_1 的减小而单调增大.根据测得的大量数据,可将 I_{th} 与 R_1 的关系拟合成如图 7 所示曲线.经过线性回归处理,可导出如下关系式:

$$R_1 = R_0 \kappa (I_{th}/I_{th0})^{-6}, \quad (18)$$

式中 R_0 是镀膜之前的腔面反射率; I_{th} 与 I_{th0} 分别是镀膜之后与镀膜之前的阈值电流; κ 是一个与芯片阈值增益、损耗以及器件结构有关的因子,取值为 0.5—1,由实验决定.

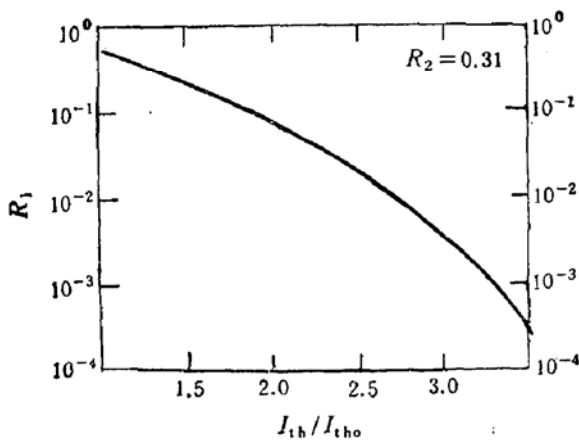


图 7 阈值电流与反射率关系

表 2

G_s	R_{1d}	κ_d	R_{1s}	R_{1o}
102	0.08	0.898	0.01	0.002
162	0.06	0.764	0.008	0.001
258	0.04	0.642	0.007	0.0005
409	0.03	0.607	0.006	0.0001

从上述理论分析与实验结果我们看到,对于 LD 功率输出,其自然解理面反射率并不是最佳反射率.最大输出功率对应的腔面反射率与芯片的单程增益 G_s 有关.为获得单端大功率输出 LD,其芯片后端面反射率 R_2 应不小于 90%,而前端面反射率 R_1 的取值则由下述经验公式确定:

$$R_{1d} = \kappa_d / G_{im}^{1/2}, \quad (19)$$

其中 G_{im} 是芯片的单程最大增益, κ_d 为比例系数, 由实验决定, 在增益为 20—26dB (即 102—409) 之间时, 其值为 0.6—1.0.

LD 芯片一端镀制减反膜可获得超辐射输出, 这时 $R_2 = 0.31$, R_1 则应满足如下条件:

$$R_{1s} < 1/G_{im}. \quad (20)$$

LD 腔面反射率的进一步降低, 将使 LD 转变为 TW-SLA. 此时, 光信号在有源区内只是单程行进(单端 TW-SLA) 或来回双程行进(双端 TW-SLA), 并获得光学增益, 从而可直接地放大微弱光信号. 为获得 TW-SLA, 要求腔面反射率 R_1 达到:

$$R_{1s} < 1/G_{im}^2. \quad (21)$$

表 2 示出几种不同增益的 LD 芯片的 R_{1d} , R_{1s} 和 R_{1s} 的测试数据.

五、结 语

理论分析与实验结果表明, LD 输出光功率特性与芯片腔面反射率密切相关. 降低腔面反射率将使得 LD 转变为高功率输出器件或 SLD 或 TW-SLA 器件, 每一种情形都要求腔面反射率满足一定条件, 这些条件与芯片内增益 G_i 的大小有关. 利用本文研究结果已成功地研制出相应的半导体光有源器件, 其性能指标接近目前国际同类产品水平.

本文作者特别感谢武汉电信器件公司、中国科学院北京半导体所海特公司及国家光电子工艺中心给予的大力支持.

参 考 文 献

- [1] 黄德修, 半导体光电子学, 电子科技大学出版社(成都), pp. 132~134(1989).
- [2] 蔡伯荣, 王瑞丰, 程泽东等, 激光器件, 湖南科学技术出版社(长沙), pp. 255~257, 310~312(1983).
- [3] Dexiu Huang, Deming Liu, Siyuan Yu, et al., *Electronics Letters*, 27(7), 571(1991).
- [4] 黄德修, 刘德明, 张其超等, 中国激光, 15(7), 400(1988).

Theoretical and Experimental Studies of Power Output Characteristics of Semiconductor Lasers

Jiu Deming, Huang Dexiu and Huang Juxian

(Huazhong University of Science & Tech., Wuhan, 430074)

Abstract

The relation between the power output characteristics of the laser diode (LD) and the reflectivity of the cavity facets of the LD are analyzed and studied. It is shown from the results of the studies that by means of changing the reflectivity of the cavity facets of the LD, the power output may be increased and new-type optoelectronic devices such as superradiation laser diode (SLD) and travelling-wave semiconductor laser amplifier (TW-SLA) may be developed. On the basis of a lot of experimental data, a formula for describing the relation between the threshold current of the P-I curve and the reflectivity of the cavity facets is derived. The optimum reflectivity for the maximum power output and the conditions for the operation of the high-power-output LD, SLD and TW-SLA are determined.

EEACC: 4320J, 4190F, 6260