

半导体超辐射发光管自发发射因子的估算*

赵永生 宋俊峰 韩伟华 李雪梅 杜国同 高鼎三

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

摘 要 自发发射因子 β 是半导体光电器件的重要参数, 在以往对超辐射发光管的特性分析, 特别是应用速率方程对超辐射器件的光强进行估算时, 多沿用与超辐射发光器件相应结构激光器的 β 因子, 由于两者的光输出特性不同, 这种沿用不仅会造成 β 因子物理意义上的混乱, 而且也给超辐射器件光电特性的分析带来了较大的误差。对超辐射发光管的自发发射因子 β 进行了讨论, 提出了平均自发发射因子的概念, 并对增益导引及折射率导引的 β 因子进行了估算和比较。

关键词 自发发射因子, 超辐射发光管, 增益导引, 折射率导引。

1 引 言

宽光谱、短相干长度超辐射光源, 是光纤陀螺^[1]、波分复用光通讯及光处理技术^[2]、层析成像技术^[3]的理想光源, 近年来在国内外多有研究。在器件光电特性的分析及结构设计时, 由于其结构与半导体激光器相似, 常沿用半导体激光器动力学中的局域速率方程或称为行波速率方程。然而, 因超辐射发光管是在非谐振状态下工作, 与激光器光谱特性不同, 完全套用激光器的理论必然会存在一些问题。比如, 方程中出现的自发发射因子 β 在激光器中的定义是: 器件中耦合到激射模中的自发发射部分与总自发发射率之比, 但是由于超辐射器件不存在光振荡, 发射光谱是连续谱, 若将此参数直接用于超辐射发光管的理论分析中, 显然不合理。然而迄今为止, 大多数作者在超辐射器件的研究中仍沿用激光器 β 因子的有关数据^[4]。本文对超辐射发光管的自发发射因子 β 进行了讨论, 提出了平均自发发射因子的概念, 并对增益导引及折射率导引的 β 因子进行了估算和比较。计算结果表明, 超辐射发光器件的自发发射因子 β 较大, 数量级为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 。

2 自发发射因子 β 的估算

2.1 超辐射自发发射因子 β 的定义

自发发射因子 β 是表征器件自发发射对输出光贡献大小的参数。对激光器而言, 输出光为激光, β 因子表示总自发发射对激射模式的贡献; 对超辐射发光管来说, 输出光是放大的自发发射, 是自发发射和受激发射的叠加, 所有可输出的自发发射成分都可能对光输出有

* 国家自然科学基金资助项目(69896260, 69777005)。

收稿日期: 1997-10-20; 收到修改稿日期: 1998-02-05

贡献，因此超辐射发光管的 β 因子可定义为^[5]

$$\beta = \frac{\text{对光输出有贡献的自发发射率}}{\text{总自发发射率}}$$

设波长为 λ 的自发发射因子为 $\beta(\lambda)$ 。对激光器来说， $\beta(\lambda)$ 是模式的函数，自发发射因子 β 应是自发发射对各种激射模式贡献之和，而连续光谱 β 因子可表示为

$$\beta = \int_0^{\infty} \beta(\lambda) d\lambda \tag{1}$$

若自发发射是各向同性的， $\beta(\lambda)$ 因子可近似的表示为

$$\beta(\lambda) = (\Omega'/\Omega) R_{sp}(\lambda)/R_{sp} \tag{2}$$

式中 Ω 为总自发发射的空间立体角， Ω' 为对光输出可能有贡献的立体角， R_{sp} 为总自发发射率， $R_{sp}(\lambda)$ 是波长为 λ 的自发发射率。由于超辐射是连续谱分布，因此

$$R_{sp} = \int_0^{\infty} R_{sp}(\lambda) d\lambda \tag{3}$$

由(1)式、(2)式和(3)式有

$$\beta = \Omega'/\Omega \tag{4}$$

可见对超辐射发光管的 β 因子，可用对光输出可能有贡献的立体角和总自发发射的空间立体角之比进行简单的估算。

2.2 增益导引超辐射发光管 β 因子的估算

对增益导引结构的超辐射发光管，在垂直于结平面方向存在光限制，设有源区的折射率为 n_1 ，上下限制层的折射率为 n_2 ，如图1所示，则光全反射时入射光与光传播方向的夹角 θ_c 为

$$\theta_c = \arccos (n_2/n_1) \tag{5}$$

在垂直方向小于该角的自发发射部分均可能对 β 因子有贡献。

在平行于结平面方向，由于不存在侧向限制，大部分自发发射成分将在条形电流注入区之外被吸收，只有沿条形区一定立体角的自发发射部分，才可能对器件的光输出有贡献。设超辐射发光管是理想的单程光放大器件，其水平发射角(平行结平面方向)为 φ ，垂直发射角

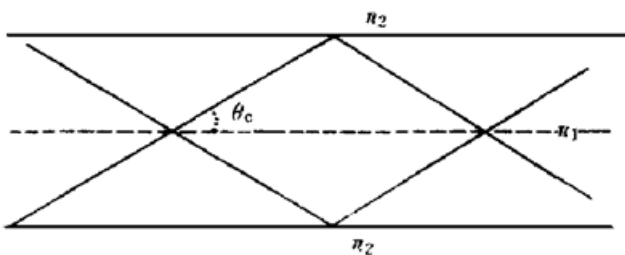


Fig. 1 Light propagation in the gain guide structure of the superluminescent diodes

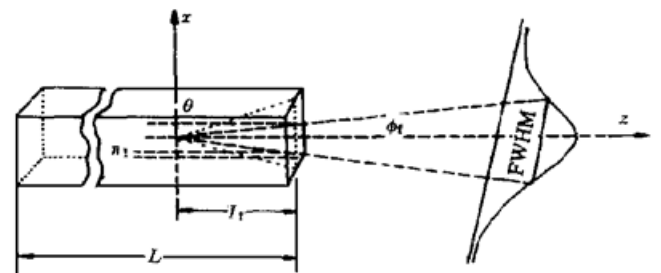


Fig. 2 Schematic diagram of the relationship between output light and the FWHM

为 θ ，并取如图2所示的坐标系，则

$$\beta = \frac{\int_{-\varphi}^{\varphi} d\varphi \int_{\pi/2-\theta_c}^{\pi/2+\theta_c} \sin \theta d\theta}{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta} \tag{6}$$

其中 φ 是对超辐射发光管光输出可能有贡献的水平发射角，可近似地表示为

$$\varphi = \arctan [W/2(L - z)] \tag{7}$$

这里 L 为器件的腔长， W 为电流注入区宽度。所以有

$$\beta = (1/\pi) \sin \theta_c \arctan [W/2(L - z)] \quad (8)$$

可见对增益导引结构,在条形电流注入区的光传播方向上(z 方向),各点的 β 因子是不相同的。在应用此参数求解速率方程时可取其平均值:

$$\bar{\beta} = \frac{\sin \theta_c}{\pi L} \left[\int_0^{L-l_f} \arctan [W/2(L - z)] dz + \mathcal{Q}l_f \right] \quad (9)$$

上式在对 β 因子求平均时增加了第二项,它是与器件的结构及远场分布有关的常数。此项的引入是考虑到超辐射器件在出光端面附近一定范围内可输出的水平发射角较大,但对超辐射输出功率有贡献的,主要是与远场半高宽(FWHM)对应的水平发射角 $2\mathcal{Q}$ 范围内的自发发射。设在器件的发光条区内与 \mathcal{Q} 对应的发光点到器件出光面的距离为 l_f ,则

$$l_f = W/2 \tan \mathcal{Q} \quad (10)$$

在此范围内的自发发射因子可视为常数:

$$\beta' = (1/\pi) \sin \theta_c \mathcal{Q} \quad (11)$$

这里 β 因子的估算适合于单程光传输情况,对于双向传播超辐射器件应取其两倍。

2.2 折射率导引起超辐射发光管 β 因子的估算

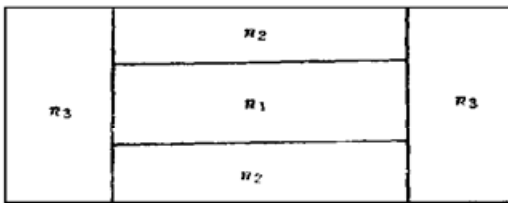


Fig. 3 Cross-section structure diagram of the index-guide superluminescent diodes

对折射率导引起超辐射器件,在与结平面垂直及平行的方向对光均有限制,通常情况下,这两个方向对光限制的程度是不同的。设垂直方向,上下限制层的折射率为 n_2 ,水平方向侧向限制层的折射率为 n_3 ,如图3所示,则光在腔体内全反射的条件为

$$\theta_{c\perp} = \arccos (n_2/n_1) \quad (12)$$

$$\theta_{c\parallel} = \arccos (n_3/n_1) \quad (13)$$

所以有

$$\beta = \frac{1}{4\pi} \int_{-\theta_{c\parallel}}^{\theta_{c\parallel}} d\mathcal{Q} \int_{\frac{\pi}{2}-\theta_{c\perp}}^{\frac{\pi}{2}+\theta_{c\perp}} \sin \theta d\theta = \frac{1}{\pi} \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} \arccos (n_3/n_1) \quad (14)$$

对于宽条器件与增益导引结构作同样的考虑,应取平均自发发射因子:

$$\bar{\beta} = (\sin \theta_{c\perp}/\pi L) [\mathcal{Q}_{\parallel}(L - l_f) + \mathcal{Q}l_f] \quad (15)$$

3 分析与讨论

对于增益导引结构,设 $n_1 = 3.55$, $n_2 = 3.35$,应用公式(9)、(10)、(11)并取 $\mathcal{Q} = 5^\circ$,即可算得图4所示的超辐射发光管平均自发发射因子 $\bar{\beta}$ 与腔长的关系曲线。为便于比较,也将与这种条形结构对应的激光器的自发发射因子一并绘于图4中。条形激光器自发发射因子 β 的计算应用如下公式^[6]:

$$\beta = K \lambda^4 / 4\pi^2 n_r^3 V \Delta \lambda \quad (16)$$

并取: $K = 2$, $\lambda = 0.83 \mu\text{m}$, $n_r = 3.55$, $\Delta \lambda = 0.03 \mu\text{m}$, $d = 0.015 \mu\text{m}$ 。

从图4中可以看出,超辐射发光管与相应的激光器结构相比,自发发射因子 β 显著增大,数量级在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 之间。在应用公式(16)计算激光器的 β 因子时,实际上已经假定器件的限制因子 Γ 等于1,若考虑到 Γ 的影响,实际激光器的 β 因子比图4中计算的应更小,一般在

$10^{-3} \sim 10^{-5}$ 量级。图 4 表明， β 因子随电流注入区宽度 W 的增加而增加，而激光器的 β 因子却随条宽 W 的增大而减小，这是因为激光器宽度增加，耦合进振荡模式内的自发发射比例减少。但对于超辐射发光器件而言，由于器件是在非谐振状态，在一定范围内所有可输出的自发发射都对自发发射因子有贡献，所以 β 因子随条宽的增加而增大。

对于折射率导引超辐射发光管，当 L 足够长，即 $L \gg l_t$ 时， β 因子近似为常数，在 $n_2 = n_3 = 3.35$ 时， $\beta = 3.56 \times 10^{-2}$ 。对双向传播情况， $\beta = 7.1 \times 10^{-2}$ 。通常情况下，侧向限制较弱，由(14)式和(15)式可以看出， β 因子随侧向限制的程度而变，这一变化关系由图 5 给出。从图 5 可见，折射率导引超辐射发光管的自发发射因子 β ，要比同样尺寸下的增益导引条形器件的 β 因子大一个数量级左右；条宽越宽 β 因子越小，这一情况与增益导引相反。随着侧向限制的减弱， β 因子明显减小，在侧向折射率 $n_3 \rightarrow n_1$ 时， β 因子很快进入 10^{-3} ，变为增益导引情况。而对于折射率导引激光器，公式(16)中的 $K = 1$ ，所以比增益导引结构的 β 因子还要小。

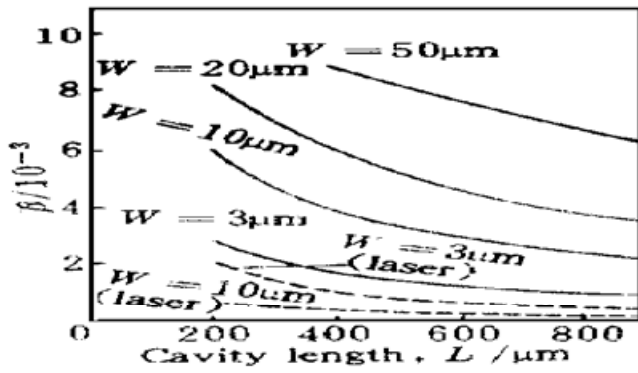


Fig. 4 Relationships of the average value β with cavity length in the gain-guide superluminescent diodes

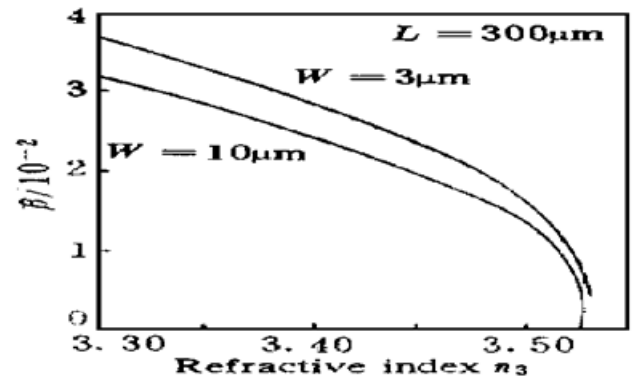


Fig. 5 Relationships of the average value β with refractive index n_3 in the index-guide superluminescent diode

半导体激光器 β 因子的不同影响着模式的分配^[7]，如：当 $\beta = 10^{-5}$ 时，光功率主要集中在一个模式中；在 $\beta = 10^{-4}$ 时，有 80% 的功率集中在一个模式中，其余由旁模所分配；在 $\beta = 10^{-3}$ 时，功率为众多的模式所分配，此时光谱包络已接近连续谱的情形。可见光谱越接近连续光谱， β 因子就越大。超辐射发光管的发射光谱是连续谱，类似于多纵模的极限情况，因此 β 因子应更大。这也是对超辐射发光管应具有较大的 β 因子的一个佐证。

本文对 β 因子的估算具有一定的近似性，严格的求解 β 因子还应考虑一些较复杂的过程，如：载流子浓度的不均匀性引起的侧向折射率分布的变化对 β 因子的影响；有源区厚度对 β 因子的影响，以及出光端面的衍射效应等。但用立体角对自发发射因子的估算已基本反应了其主要的物理内涵，实际上人们在用速率方程计算或讨论问题时，往往知道 β 因子的数量级也就够用了。

结 论 超辐射发光管的自发发射因子 β 与半导体激光器的该因子具有不同的物理内涵，其数值大小也与相应结构的激光器有较大的差别，超辐射发光管有较大的 β 因子，这是连续光谱的主要特征。折射率导引结构超辐射发光管的自发发射因子最大，一般在 10^{-2} 左右，增益导引结构次之，一般为 10^{-3} 左右，这两种结构的 β 因子均比相应的激光器结构的大。

参 考 文 献

- [1] Burns W K, Chen Chin-lin, Moeller R P. Fiber-optic gyroscopes with broad band sources. *J. Lightwave Tech.*, 1983, **LT-1**(2) : 98~ 105
- [2] Goedgebuer J-P, Ferriere R. Multichannel acousto-optic correlator that uses a low-coherence source. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(11) : 1343~ 1345
- [3] Deng K L, Lu C H, Wang J P *et al.*. Measurements of nanometer surface structure by incoherent confocal laser-feedback. *CLEO'94, Technical Digest Series*, Washington, D C: Opt. Soc. America, 1994. 8, 431~ 435
- [4] Takayama T, Imafuji O, Kouchi Y *et al.*. 100 mW high-power angled-stripe superluminescent diodes with a new real refractive-index-guided self-aligned structure. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1996, **QE-32**(11) : 1981~ 1987
- [5] Kwong N S K, Lau K Y, Bar-chaim N. High-power high-efficiency GaAlAs superluminescent diodes with an internal absorber for lasing suppression. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1989, **QE-25**(4) : 696~ 704
- [6] Petermann K. Calculated spontaneous emission factor for double-heterostructure injection lasers with gain-induced waveguiding. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **QE-15**(7) : 566~ 570
- [7] Lee T P, Burrus C A, Copbland J A. Short-cavity InGaAsP injection lasers: dependence of mode spectra and single-longitudinal-mode power on cavity length. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**(7) : 1101 ~ 1113

Estimation of Spontaneous Emission Factor for Semiconductor Superluminescent Diodes

Zhao Yongsheng Song Junfeng Han Weihua Li Xuemei
 Du Guotong Gao Dingsan

(Department of Electronic Engineering and State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics,
 Jilin University, Changchun 130023)

(Received 20 October 1997; revised 5 February 1998)

Abstract Spontaneous emission factor β is an important parameter to characterize semiconductor optic-electronic devices. In characteristic analysis of the superluminescent diodes, especially, in calculation of optical intensity using the rate equations, the value of the factor β estimated in the laser diodes is commonly applied since the superluminescent and laser diodes are similar in the structures. However the two types of devices are quite different, the extended usage of the factor may lead to confusion in physical concepts and make great error. In this paper, the spontaneous emission factor β for the superluminescent diodes is discussed, and a new concept on average value of the laser β is proposed. From estimation and comparison, the factors β of gain-guide and index-guide structures are obtained.

Key words superluminescent diodes, spontaneous emission factor, gain-guide structures, index-guide structures.