

自发辐射对量子级联激光器发光噪声的影响

陈贵楚^{1,2}, 范广涵²

(1. 肇庆学院 物理系, 广东 肇庆 526061; 2. 华南师范大学 光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631)

摘要: 为得到量子级联激光器特有的光噪声特性, 通过在速率方程中引入 Langevin 噪声源以及自发辐射因子的方法, 在单模与线性增益的情况下讨论了自发辐射因子及与偏置电流等参数与光噪声的强度及带宽等特性之间的关系, 计算结果表明, 增大自发辐射因子能降低光噪声的强度, 增宽光噪声的 3-dB 截止频率, 进一步的研究也表明, 自发辐射因子对光噪声的影响与激光器的偏置电流有密切关系, 这种影响在偏置电流较小时比较明显, 但当偏置电流很大时自发辐射因子对光噪声的影响将变得很弱。

关键词: 量子级联激光器; 光噪声; 速率方程

中图分类号: TN248.4

PACS: 78.55.Cr

PACC: 7855E

文献标识码: A

1 引 言

量子级联激光器 (quantum cascade laser, 简称 QCL) 是单极性发光器件, 是目前最重要的中远红外光源^[1,2]。与双极型半导体激光器 (semiconductor laser, 简称 SL) 的电子与空穴复合发光不同的是 QCL 是由电子或空穴在导带或价带的子能级之间发生跃迁而产生激光。QCL 的有源层是由多个周期重复的单元组成, 每个单元由一个注入区与一个增益区组成, 重复的数目可以从几十到上百。与 SL 只有一个增益区比较, QCL 的载流子能在多个增益区实现多次发光, 而且 QCL 的器件结构远比 SL 要复杂得多, 其有源层的体积也比 SL 大得多。

由于 QCL 不同于 SL 的发光原理, QCL 的噪声会表现出与 SL 不同的特征。分析激光器的噪声的基本方法是求解含噪声项的速率方程, 其中噪声项一般是 Langevin 噪声源。文献[3]以速率方程为基础对 QCL 的噪声进行了全面分析, 其中在速率方程中引入了表征自发辐射的参数 n_{sp} , 但文献中最后的计算结果没有看到自发辐射与光噪声之间的具体关系。由于激光器光噪声的来源之一是自发辐射, 因此自发辐射对 QCL 的光噪声有重要的影响, 我们在速率方程中引入了自发辐射

因子 β , 对 QCL 的光噪声与自发辐射因子的关系进行理论分析, 可以获得 QCL 的噪声特性。

2 速率方程与计算

我们引用的器件模型来自于文献[3], 图 1 是其能带结构与电子在能级间的输运过程。在激励条件下, 注入的电子从注入层通过隧道效应穿过第一个势垒在第一个阱中的子能带 E_3 上积累, 通过控制子带间弛豫速率, 电子在同一阱中的子能带 E_3 与 E_2 上形成粒子数反转, 电子从能级 E_3 向 E_2 跃迁产生激光, 激光光子的能量等于这两个能级之差; 能级 E_2 上的电子以较快的弛豫速率向相邻阱中的子能级 E_1 转移, 再由 E_1 能级经过渐

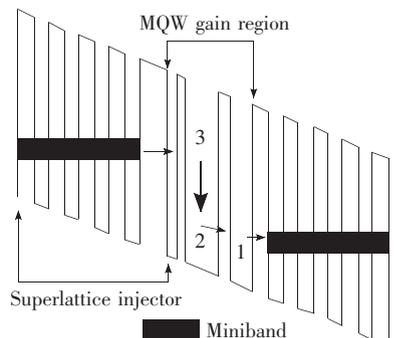


图 1 QCL 的一个单元的能带结构与电子输运图

Fig. 1 The band structure of QCL and its carriers transport

收稿日期: 2008-08-25; 修订日期: 2008-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(50602018); 广州市 LED 工业化研究基地项目(2004U13D0021); 肇庆学院自然科学基金(0629)资助项目

作者简介: 陈贵楚(1973-), 男, 湖南岳阳人, 主要从事光电子材料与器件的研究。

E-mail: gchenbox@163.com

变层注入下一个单元再一次产生激光。

能够描述图 1 中的载流子与光子行为的是速率方程,考虑到文献[3]中的速率方程过于繁杂,我们用一组简化方程来代替。由于激光是在能级 E_3 与 E_2 之间产生,只需要反映能级 E_3 与 E_2 上的电子以及光子行为的速率方程即可。

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{N_3}{\tau_n} - v_g g(N_3, N_2) P \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{N_3}{\tau_n} - \frac{N_2}{\tau_r} + v_g g(N_3, N_2) P \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = v_g g(N_3, N_2) P + \beta \frac{N_3}{\tau_n} - \frac{P}{\tau_p} \quad (3)$$

其中 N_3, N_2 与 P 分别是能级 E_3 与 E_2 的电子以及增益区中光子数密度, I 是注入电流, e 是基本电荷电量, τ_n 是载流子寿命,对应于文献[3]中的 τ_{32}, τ_r 是载流子从能级 E_3 向 E_2 转移的时间,对应于文献[3]中的 τ_{21}, τ_p 是光子寿命, v_g 是光速, $g(N_3, N_2)$ 是光增益, β 是自发辐射因子。为了简化问题,此处假设激光器是单模情形并且是在线性增益条件下工作,即 $g(N_3, N_2) = a(N_3 - N_2)$, a 是增益系数。

假定 QCL 是以静态抽运条件工作,则外部电路的电流起伏可以忽略^[5],意味着可不考虑电流噪声,只需要考虑光子与载流子的噪声。为了得到 QCL 的噪声特性,可对式(1)~(3)进行微扰分析,令:

$$N_3 = N_{3b} + n_3(t), N_2 = N_{2b} + n_2(t), \\ P = P_b + p(t) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} j\omega + 1/\tau_n + v_g g P_b \cdots \cdots & -v_g g P_b \cdots \cdots & 1/\tau_p \\ -(1/\tau_n + v_g g P_b) \cdots \cdots & j\omega + 1/\tau_r + v_g g P_b \cdots \cdots & -1/\tau_p \\ -v_g g P_b - \beta/\tau_n \cdots \cdots & v_g g P_b \cdots \cdots & j\omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_3 \\ n_2 \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_3(\omega) \\ f_2(\omega) \\ f_p(\omega) \end{bmatrix} \quad (10)$$

求解上面的矩阵方程可得到:

$$H(\omega)p(\omega) = r_3(\omega)f_3(\omega) + \\ r_2(\omega)f_2(\omega) + r_p(\omega)f_p(\omega) \quad (11)$$

其中,

$$H(\omega) = -j\omega^3 - \omega^2(2v_g g P_b + 1/\tau_p + 1/\tau_r) + \\ j\omega[2v_g g P_b/\tau_p + v_g g P_b/\tau_r + \beta/(\tau_n \tau_p) + \\ 1/(\tau_n \tau_r)] + 1/(\tau_r \tau_p)(v_g g P_b + \beta/\tau_n) \quad (12)$$

$$r_3(\omega) = v_g g P_b [(\beta - 1)/\tau_n + 1/\tau_r] + \beta/(\tau_n \tau_r) \quad (13)$$

$$r_2(\omega) = v_g g P_b [-j\omega + (\beta - 1)/\tau_n] \quad (14)$$

$$r_p(\omega) = -\omega^2 + j\omega(2v_g g P_b + 1/\tau_n + 1/\tau_r) + \\ v_b g P_b/\tau_r + 1/(\tau_n \tau_r) \quad (15)$$

需要注意的是与 $f_i(\omega)$ 有关的频域扩散系数与式

其中 $n_i(t)$ 与 $p(t)$ 分别表示载流子与光子密度起伏的小量。

将式(4)代入式(1)~(3),利用速率方程的稳态形式,忽略小量的高阶项,可得到线性化的速率方程:

$$\frac{dn_3(t)}{dt} = -\frac{n_3}{\tau_n} - v_g g(n_3 - n_2)P_b - \\ v_g g(N_{3b} - N_{2b})p + f_3(t) \quad (5)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = \frac{n_3}{\tau_n} + v_g g(n_3 - n_2)P_b + \\ v_g g(N_{3b} - N_{2b})p - \frac{n_2}{\tau_r} + f_2(t) \quad (6)$$

$$\frac{dp(t)}{dt} = v_g g(n_3 - n_2)P_b +$$

$$v_g g(N_{3b} - N_{2b})p + \beta \frac{n_3}{\tau_n} - \frac{p}{\tau_p} + f_p(t) \quad (7)$$

其中 $f_i(t)$ 是对应各项的 Langevin 噪声源,它们满足下列关系式:

$$\langle f_i(t)f_j(t') \rangle = 2D_{ij}\delta(t - t') \quad (8)$$

D_{ij} 是与各项噪声源有关的扩散系数,利用文献[3]的计算方法,能得到 6 个扩散系数。将式(1)~(3)的微分项设为 0,求其稳态解,能得到如下表达式:

$$V_g g(N_{3b} - N_{2b}) = 1/\tau_p \quad (9)$$

利用式(9)对式(5)~(7)简化并进行傅里叶变换,可以得到如下矩阵方程:

(8)中的时域扩散系数 D_{ij} 计算结果是一样的。

我们用相对强度噪声 RIN 来表示光噪声,计算公式如下^[3]:

$$RIN = 10 \lg \left[\frac{K_p(\omega)}{P_b^2} \right] \quad (16)$$

其中 $K_p(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega'}{2\pi} \langle p(\omega)p(\omega - \omega') \rangle$ 是光子噪声功率谱。

3 计算结果与讨论

与速率方程有关的各个参数引用于文献[3]: $a = 4.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$, $v_g = 7.5 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $\tau_n = 2.1 \text{ ps}$, $\tau_r = 0.5 \text{ ps}$, 光子寿命 τ_p 可由文献[3]

中的公式(6)计算为7.6 ps, 自发辐射因子 β 是个关键参数, 自发辐射因子的计算方法可从文献[6]中的式(13)借鉴, 即 $\beta = \xi \frac{\lambda_s^2}{4\pi^2 n_{\text{eff}}^3 V \Delta\lambda_s}$, 其中 ξ 是限制因子, n_{eff} 是有效折射率, λ_s 与 $\Delta\lambda_s$ 分别是峰值波长与发光谱的半峰全宽, V 是有源区体积。从计算公式知道此参数与器件的有源区体积成反比, 对QCL来说, 改变有源区重复单元的数目就可以改变其有源区的体积大小, 在其它参数确定的情况下, 有源区不同数目的重复单元对应于不同的自发辐射因子。因此要讨论变化的 β 对QCL噪声的影响, 可以通过改变重复单元的数目来实现, 下面的计算我们将速率方程中的 β 取三个值, 即: 2.0×10^{-7} , 1.0×10^{-6} 和 5.0×10^{-6} 。

图2是在偏置电流 $I_b = 1.2I_{\text{th}}$ 的工作条件下得到的对应于三个 β 取值的RIN频谱曲线。从图中可以发现, 与SL的噪声频谱曲线出现谐振峰^[7]不同的是, QCL的频谱曲线是平坦的, 原因是QCL的载流子寿命与光子寿命是同样的数量级, 并且比光子寿命还要小, 造成激光器的弛豫振荡处于过阻尼状态。这个结果与文献[3]计算得到的QCL的RIN特性相类似, 并且与Richard M. Williams与Tanya L. Myers报道的有关QCL的噪声特性的实验结果相符^[8]。另外我们发现在 $1.2I_{\text{th}}$ 的偏置电流情况下自发辐射因子 β 对QCL的光噪声强度影响明显, 当 β 从 2.0×10^{-7} 增加到 5.0×10^{-6} 时, 低频噪声强度从-163.8 dB降低到-183.8 dB。

从图2中还可以发现自发辐射因子对光噪声特性的3-dB截止频率有明显的影响, 当 β 从 2.0×10^{-7} 增加到 5.0×10^{-6} 时, 3-dB截止频率从

2.0 GHz增加到4.1 GHz。考虑到图2是在 $1.2I_{\text{th}}$ 的偏置电流情况下得到的, 我们在偏置电流分别为 $2.0I_{\text{th}}$ 和 $6.0I_{\text{th}}$ 的情况下计算了对应于三个不同 β 取值的光噪声的3-dB截止频率。从图3的结果可以看出, 随着偏置电流的增加, 自发辐射因子对3-dB截止频率的影响在减弱, 当偏置电流为 $6.0I_{\text{th}}$ 时, 3-dB截止频率几乎是一个固定值, 自发辐射因子的改变对其几乎没有影响。这是由于光噪声的3-dB截止频率类似于调制特性的3-dB带宽 $\omega_{3\text{dB}}$, 而 $\omega_{3\text{dB}}$ 在激光器的偏置电流很大时会趋向于一个饱和值, 即: $1/2\pi\tau_p$, 这是由于在QCL的所有时间参数里光子寿命是最大的, 最大的带宽由光子寿命决定^[3], 因此也就决定了在偏置电流很大时自发辐射因子对光噪声的3-dB截止频率基本没有影响。

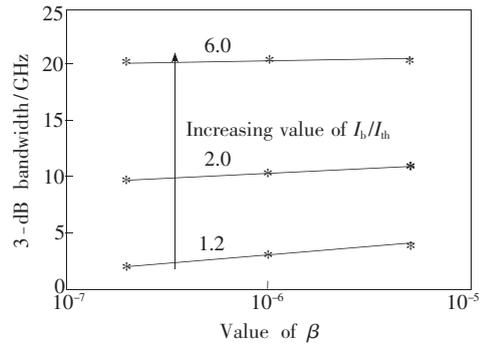


图3 在不同偏置条件下3-dB截止频率与自发辐射因子间的关系

Fig. 3 The 3-dB cut-off frequency versus β under $I_b/I_{\text{th}} = 1.2, 2.0, 6.0$

图4是低频RIN与偏置电流的关系, 当 $I_b < I_{\text{th}}$ 时, 激光器处于自发辐射状态, 此时光场是无序的, 随着偏置电流增大, 光子数目增加从而造成光

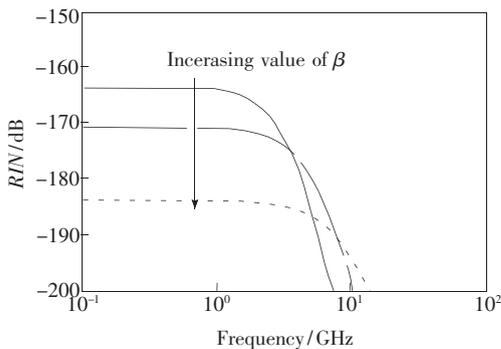


图2 在 $I_b = 1.2I_{\text{th}}$ 偏置条件下QCL的RIN与频率间的关系

Fig. 2 Plot of RIN versus frequency under $I_b = 1.2I_{\text{th}}$

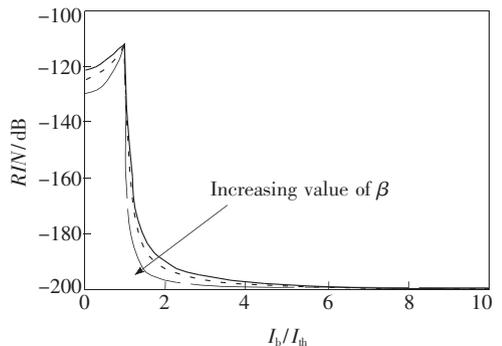


图4 在不同的自发辐射因子下低频RIN与偏置电流的关系

Fig. 4 Plot of low-frequency RIN versus I_b/I_{th} under $\beta = 2.0 \times 10^{-7}, 1.0 \times 10^{-6},$ and 5.0×10^{-6}

噪声加大,当偏置电流达到阈值电流时激光器的光噪声最大。当 $I_b > I_{th}$ 时,激光器处于受激辐射状态,此时光场变为有序,光噪声强度随之下降很多,从图中可以看出,自发辐射因子对低频噪声强度有影响,图 2 的结果也说明了这点,但这种影响

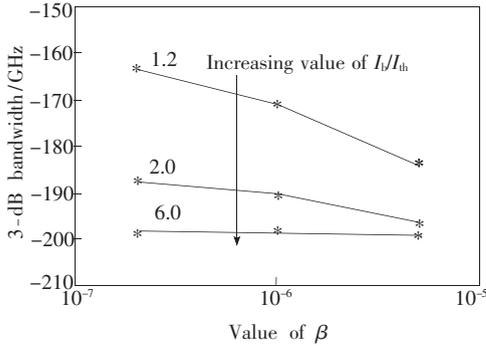


图 5 在不同偏置条件下 QCL 的 RIN 与自发辐射因子间的关系

Fig. 5 The magnitude of RIN versus β under $I_b/I_{th} = 1.2, 2.0, 6.0$

只有在偏置电流较小时才比较明显,为了更直观地了解这种影响与偏置电流的关系,我们采用与图 3 相同的方法得到了在三个不同的偏置电流工作条件下低频噪声强度与自发辐射因子的关系,如图 5 所示,结论类似于图 3 中的结果,当偏置电流很大时,自发辐射因子对光噪声强度的影响可以忽略。

4 结 论

我们利用速率方程与 Langevin 噪声源方法对 QCL 的 AM 光噪声进行了理论分析,结果表明自发辐射因子对光噪声的强度与 3-dB 截止频率有一定的影响,具体表现为增大自发辐射因子能降低光噪声的强度,增宽光噪声的 3-dB 截止频率,这些影响在偏置电流较小时比较明显,但当偏置电流很大时自发辐射因子对噪声的影响会变得很弱。

参 考 文 献:

- [1] Scamarcio G, Capasso F, Faist J, *et al.* Tunable interminiband infrared emission in superlattice electron transport [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(14):1796-1798.
- [2] Strasser G, Gianordoli S, Hvozdar L, *et al.* GaAs/AlGaAs superlattice quantum cascade lasers at $\lambda \approx 13 \mu\text{m}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(10):1345-1347.
- [3] Rana F, Ram R J. Current noise and photon noise in quantum cascade lasers [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**(12):125313-1-29.
- [4] McCumber D E. Intensity fluctuations in the output of cw laser oscillators [J]. *Phys. Rev.*, 1966, **141**(1):306-322.
- [5] Yamamoto Y, Machida S, Richardson W H. Photon number squeezed states in semiconductor lasers [J]. *Science*, 1992, **255**(5049):1219-1224.
- [6] Toshihiko Baba, Tetsuko Hamano, Fumio Koyama, *et al.* Spontaneous emission factor of a microcavity DBR surface-emitting laser [J]. *IEEE J. Quan. Electron.*, 1991, **21**(6):1347-1358.
- [7] Li Linlin, Wang Zhiguang, Yang Enche. AM and FM noise of semiconductor laser [J]. *Laser of China* (中国激光), 1986, **14**(9):528-530 (in Chinese).
- [8] Richard M Williams, James F Kelly, Steven W Sharpea, *et al.* Spectral and modulation performance of quantum cascade lasers with application to remote sensing [J]. *SPIE*, 1999, **3758**:11-22.

The Effect of Spontaneous Emission on AM Noise for Quantum Cascade Laser

CHEN Gui-chu^{1,2}, FAN Guang-han²

(1. Department of Physics, Zhao Qing University, Zhaoqing 526061, China;

2. Institute of Optoelectronic Material and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: The noise properties of quantum cascade laser were investigated by using rate equations, which

include the Langevin noise sources and the spontaneous emission factor, to make simulation calculation. The calculated results show that the intensity of noise and the 3dB cut-off frequency width simultaneously decrease, while increasing the spontaneous emission factor. The further research denotes that the spontaneous emission factor takes an obvious effect on the noise properties as the bias current is low, and this effect will be weakened by increasing the bias current.

Key words: QCL; noise; rate equation

CLC number: TN248.4

PACS: 78.55.Cr

PACC: 7855E

Document code: A

Received date: 2008-08-25

《中国光学与应用光学》征稿启事

经国家新闻出版总署批准,《中国光学与应用光学》于2008年10月创刊,该刊为国家级正式出版物,双月刊,A4开本,国内外公开发行,刊号:ISSN 1674-2915/CN22-1389/O4。

《中国光学与应用光学》报道如下内容:基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

《中国光学与应用光学》诚征学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。根据期刊定位,编辑部将优先发表内容新颖、可读性强的综述性论文和用英文发表的学术性论文。

《中国光学与应用光学》热忱欢迎广大读者、作者关心和支持本刊的发展,并积极订阅、踊跃赐稿,来稿请发送到 gxxygx2007@126.com。

编辑部地址:吉林省长春市东南湖大路3888号 邮编:130033

电邮:gxxygx2007@126.com

电话:0431-86176852 0431-84627061

传真:0431-84695881

《中国光学与应用光学》编辑部