

# 微腔效应对垂直腔面发射激光器谐波和互调失真的影响

张 博<sup>1,†</sup> 吕英华<sup>1</sup> 张金玲<sup>2</sup>

(1 北京邮电大学通信网络综合技术研究所, 北京 100876)

(2 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

**摘要:** 采用速率方程与 Volterra 变换方法, 分析了垂直腔面发射激光器在微波模拟调制情况下, 频率、自发辐射因子以及自发辐射寿命对三阶谐波和三阶互调失真的影响. 结果表明垂直腔面发射激光器的非线性失真依赖于自发辐射物理量的变化. 对激光器的自发辐射进行适当控制, 可以抑制非线性对性能的影响, 扩大其最大调制频率, 提高基于 VCSELs 器件的 ROF (radio over fiber) 系统的性能和应用范围.

**关键词:** 光纤射频系统; 三阶谐波失真; 三阶互调失真; 垂直腔面发射激光器

**PACC:** 4280S; 4660D; 8160C

**中图分类号:** TN248.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)09-1625-05

## 1 引言

近年来, 将微波信号通过模拟光纤传输系统传输的方案得到大量研究, 并成功应用于有线电视、现代移动通信等领域<sup>[1,2]</sup>, 为信息分布网络提供简单且低成本的解决方案, 可为用户实现便捷的无线接入. 此系统中, 由于光连接器件的非线性而产生的谐波失真和互调失真是造成系统性能下降的主要因素<sup>[3,4]</sup>, 其主要来源于激光器件的非线性. 围绕非线性失真已有大量研究, 一般采用外调制器<sup>[5]</sup>和预校正电路<sup>[6]</sup>改善性能, 但系统成本增加. 垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs) 具有低成本、易集成、高调制带宽的特点, 其 SFDR (spurious free dynamic range) 满足 ROF (radio over fiber) 无线应用<sup>[7]</sup>, 已有多种基于 VCSELs 器件的 ROF 系统<sup>[8]</sup>. 由于 VCSELs 较大的谐波和互调失真, 目前主要应用于室内短距离传输. 当前 ROF 系统在车载道路通信、乡村通信的应用研究, 迫切需要低成本高线性的 VCSELs 器件. 另一方面, 随着微电子机械系统 (microelectromechanical systems, MEMS) 加工技术的快速发展, 通过使用 MEMS 技术来移动或旋转某个反射腔镜, 可实现 VCSELs 波长的宽可调谐范围, 这样可实现低成本的波分复用 ROF 系统.

相对于一般边发射激光器, VCSELs 的有源层可以很小, 当腔长为波长量级时产生腔的量子电动

力学效应. 增强的自发辐射是微腔效应的主要体现, 并且与腔结构参数密切相关. 利用腔量子电动力学理论, 自发辐射物理量随着腔长的增加呈现周期性的变化<sup>[9]</sup>. Ram 等人<sup>[10]</sup>测量了直径由 30 $\mu\text{m}$  到 5 $\mu\text{m}$  的微腔, 其自发辐射因子由  $10^{-4}$  增加到了  $10^{-2}$ . 研究均表明微腔尺寸、几何结构、孔径等结构参数的变化可在较大程度上影响自发辐射因子和自发辐射寿命. 为此需要考察自发辐射物理量对微腔激光器模拟调制时谐波失真和互调失真的影响, 然而目前自发辐射物理量对于模拟应用非线性失真影响的研究还未见报道. 本文以 VCSELs 为研究对象, 采用速率方程结合 Volterra 变换<sup>[11]</sup>的方法, 对于不同的调制频率, 分析了自发辐射因子和自发辐射寿命对 VCSELs 三阶谐波失真 (third harmonic distortion, THD) 和三阶互调失真 (third-order intermodulation distortion, IMD) 的影响, 给出非线性失真随自发辐射物理量的变化规律, 为应用于 ROF 系统的 VCSELs 器件设计和应用提供理论依据.

## 2 理论基础

### 2.1 ROF 系统

本文主要针对的 ROF 系统如图 1 所示, 采用 RF (radio frequency) 信号对 VCSELs 进行直接强度调制, 并采用探测器直接探测. 在此方式中, 将 RF 信号加载于注入电流上, 使激光二极管的注入

† 通信作者. Email: zhbomail@126.com

电流得到调制,相应调制了输出激光的光强.调制后的光波信号经过光纤传输至光电探测器(photo diode, PD).经过 PD 光电转换后,已调的光信号产生已调电流,通过 PD 的负载电阻输出 RF 功率.

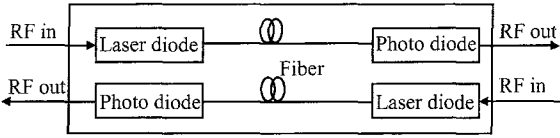


图 1 采用直接强度调制的 ROF 系统光链路

Fig.1 Layout of a ROF optical link using direct modulation laser diodes

### 2.2 THD 和 IMD 的计算

微腔激光器中的自发辐射起着重要作用,阈值以及稳态光子密度均随自发辐射因子和自发辐射寿命而变化.由文献[12]知,微腔结构半导体激光器的速率方程写为:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \left(\frac{1}{\tau_{sp}} + \frac{1}{\tau_{nr}}\right)N - \frac{gP}{V} \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau_p} + gP + \frac{NV}{\tau_{sp}} \quad (2)$$

其中  $N$  为有源区的载流子浓度;  $P$  为腔中光子数密度;  $q$  为电子电荷;  $V$  为有源区体积;  $I$  为注入电流;  $\tau_p$  为光子寿命;  $\tau_{sp}$  为自发发射寿命;  $\tau_{nr}$  为非辐射复合寿命;  $\gamma$  为自发辐射因子;  $g$  为光增益,  $g = a(N - N_0)$ , 其中  $a$  为增益斜率(由文献[12]知,  $a = V/\tau_{sp}$ ),  $N_0$  为透明载流子浓度.

忽略非辐射复合的影响,并令  $\tau_{nr} = 1/\gamma$ ,  $I = I_0 + i(t)$ ,  $I_0$  为偏置电流,于是得到:

$$i(t) = \frac{N_0 qV}{\tau_{sp}} + I_0 + qV \left( \frac{1}{\tau_{sp}} - \frac{aP}{V} \right) \times \left[ \frac{\frac{dP}{dt} + P - \frac{N_0 V}{\tau_{sp}}}{aP + \frac{V}{\tau_{sp}}} + \frac{d}{dt} \left( \frac{\frac{dP}{dt} + P - \frac{N_0 V}{\tau_{sp}}}{aP + \frac{V}{\tau_{sp}}} \right) \right] \quad (3)$$

应用 Volterra 方法可得到微腔半导体激光器的三阶非线性失真(THD)和互调失真(IMD),分别表示为<sup>[11]</sup>:

$$\frac{THD}{C} = \frac{m^2 (I_0 - I_{th})^2}{24 |G_1(0)|^2 |G_1(2)G_1(3)|} \quad (4)$$

$$\frac{IMD}{C} = \frac{m^2 (I_0 - I_{th})^2}{8 |G_1(0)|^3 |G_1(1)G_1(2)|} \quad (5)$$

其中  $m$  为光调制指数;  $I_{th}$  为激光器阈值电流,可由速率方程计算得出,表示为:

$$I_{th} = \frac{q}{\tau_{sp}} \left( 1 + \frac{N_0 V}{\tau_{sp}} \right) \quad (6)$$

其他参数为:

$$\begin{cases} = G_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3) G_1(2\omega) - 3 G_2(\omega_1, \omega_2) G_2(\omega, 2\omega) \\ = G_3(\omega_1, \omega_2, -\omega_3) G_0(0) G_1(2\omega) - \\ 2 G_2(\omega_1, -\omega_2) G_2(\omega, 0) G_1(2\omega) - \\ G_2(\omega_1, \omega_2) G_2(-\omega_3, 2\omega) G_1(0) \end{cases} \quad (7)$$

表达式中的  $G_n$  为  $g_n$  ( $g_n$  为第  $n$  阶的 Volterra 变换)的傅里叶变换,为如下形式:

$$\begin{cases} G_1(\omega) = A \omega^2 + jB \omega + C \\ G_2(\omega_1, \omega_2) = D(\omega_1 + \omega_2)^2 + jE(\omega_1 + \omega_2) + F \\ G_3(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = L(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)^2 + \\ jM(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) + N \end{cases} \quad (8)$$

令  $P = P_0 + p(t)$ ,进一步采用谐波输入方法,通过方程(3)求出  $G_n$  中各参数,具体结果见附录.  $P_0$  为稳态光子数密度,由速率方程求出.

## 3 仿真分析

### 3.1 非线性失真随频率的变化

根据文献[12],取自发辐射寿命  $\tau_{sp} = 1\text{ns}$ ,自发辐射因子  $\gamma = 0.001$ ,光子寿命  $\tau_p = 1\text{ps}$ ,有源区体积  $V = 10^{-12}\text{cm}^3$ ,偏置电流  $I_0 = 20\text{mA}$ .光调制指数的选择将对系统信噪比产生较大的影响,光调制指数增大会使信噪比减小,由文献[13],取  $m = 0.25$ .基于以上参数,三阶谐波失真和互调失真随调制频率的变化如图 2 所示,THD 与 IMD 随频率升高单调增加.文献[14]通过实验研究指出,VCSELs 的非线性随着调制频率的增加恶化,文献[15]测量了非线性随调制频率的变化,SFDR 随着调制频率的升高,由 1GHz 时的  $103\text{dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$  降低至 7GHz 时的  $96\text{dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ ,这与本文得到的规律是一致的.由图

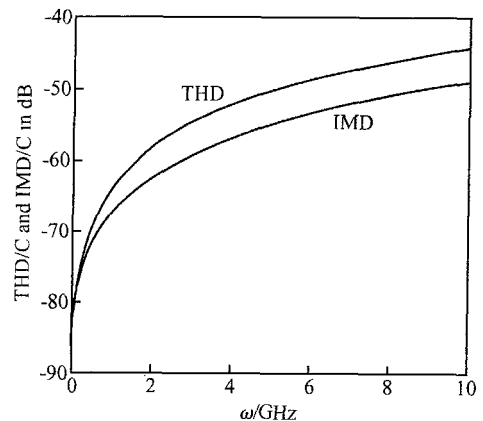


图 2 THD 和 IMD 与调制频率的关系

Fig.2 THD and IMD versus the modulation frequency

2 可以看出,在低频段,IMD 略高于 THD,对应采用低频的有线电视情况,IMD 是首要考虑的方面.当频率大于 1GHz 后,THD 高于 IMD,并随频率增加,失真程度单调增加,到 10GHz 时,谐波失真增加到 -44dB,互调失真增加至 -49dB.对于下一代移动通信中常采用的频率 2.4GHz 和 5GHz,THD 失真较 IMD 明显.

### 3.2 自发辐射因子和自发辐射寿命对非线性失真的影响

半导体垂直腔面发射激光器的微腔效应主要体现在自发辐射的增强,这主要是由于腔量子电动力学效应和经典理论效应的共同作用.由于腔结构参数的不同而对微腔激光器性能的影响,可归结到自发辐射物理量的变化对系统性能的影响.自发辐射因子  $\beta$  和自发辐射寿命  $\tau_{sp}$  是反映自发辐射的两个重要参量,由于它们之间存在着联系,因此需综合考察 THD 和 IMD 随  $\beta$  和  $\tau_{sp}$  的变化.普通边发射激光器的自发辐射因子在  $10^{-5}$  量级,微腔激光器由于微腔效应使其自发辐射因子增大(一般大于  $10^{-4}$ ),Ram 等人<sup>[11]</sup>测量了直径范围从 30 $\mu$ m 减小到 5 $\mu$ m 的垂直腔激光器的自发辐射因子,从  $10^{-4}$  增加到  $10^{-2}$ .而对  $\tau_{sp}$  的理论计算<sup>[16]</sup>表明,  $\tau_{sp}$  随腔长的变化范围主要在 0.5 ~ 2ns 之间.结合现代移动通信的频率要求,取射频频率为 2.4GHz,其余参数同上,THD 和 IMD 随自发辐射物理量的变化规律如图 3,4 所示.对于  $f = 2.4$ GHz,THD 和 IMD 体现出相同的变化规律.由图 3,4 可以看出,在如上所述的范围内,自发辐射因子的改变对 THD 和 IMD 的影响强于自发辐射寿命对失真的影响.随着自发辐射因子增大,THD 与 IMD 减弱,对于理想情况,即在自发辐射因子  $\beta$  接近 1 时,谐波失真与互调失真趋于

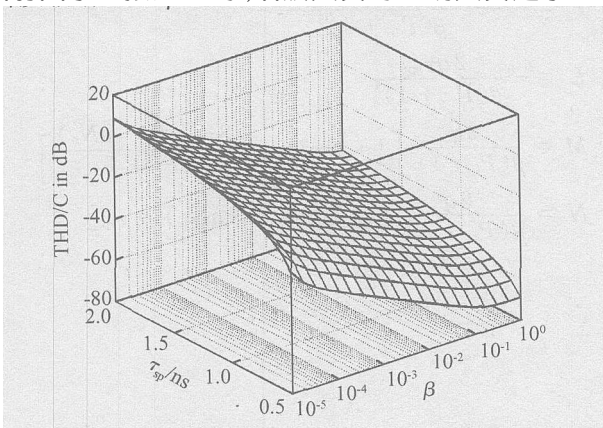


图 3 调制频率为 2.4GHz 时 THD 与自发辐射因子和自发辐射寿命的关系

Fig. 3 THD versus the spontaneous emission factor and spontaneous emission lifetime at 2.4GHz

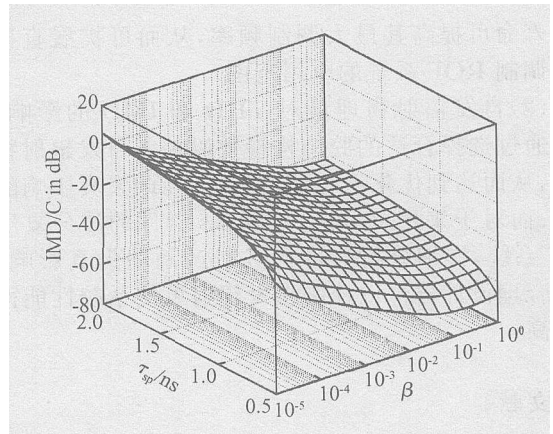


图 4 调制频率为 2.4GHz 时 IMD 与自发辐射因子和自发辐射寿命的关系

Fig. 4 IMD versus the spontaneous emission factor and spontaneous emission lifetime at 2.4GHz

同一值.同时,失真也随  $\tau_{sp}$  增加而有几个 dB 的增大.激光的振荡源于最初自发辐射耦合进入激光模式中的光子,由于腔量子电动力学效应,自发辐射因子增加,即耦合到激光模式中自发辐射速率得到加强,将使器件较快地进入受激振荡,并使激光器输出光很快地随调制信号变化,因此降低了非线性失真.而自发辐射寿命的作用则体现在改变光子与载流子的延迟时间,  $\tau_{sp}$  减小则延迟时间缩短,从而减小了记忆效应,使受激放大后振荡产生的光子很快地随调制信号变化.由分析可得出 VCSEL 非线性失真随自发辐射因子增大而减弱,利用自发辐射与体积的关系式  $\beta / \tau_{sp} = a / V$ ,将其变为非线性失真随体积的变化,即随体积增大,非线性失真增大.在实际测量中,一般采用 SFDR 表示非线性性能,文献[14]对 VCSELs 的非线性失真随激光器尺寸的变化进行了测量,在调制频率为 2GHz 时,随着体积增大,相应 SFDR 由 87.1dB  $\cdot$  Hz<sup>2/3</sup> 降到 78.9dB  $\cdot$  Hz<sup>2/3</sup>,与本文理论分析得出的规律是一致的.然而在具体数值上存在差异,这主要是由于本文在模型参数选取时存在差异,以及在实际测量中受光纤色散和光电探测器的反射等实验条件的影响等因素造成的.

## 4 结论

以上理论分析和仿真结果表明,微腔效应在使微腔半导体激光器降低阈值、达到高速调制响应的同时,也降低了激光器的记忆效应,对模拟光纤传输系统调制的非线性失真起到一定的抑制作用,大自发辐射因子、小自发辐射寿命有利于降低非线性失真.综上,可得出如下结论:

(1) 微腔半导体激光器的非线性性能随调制频率增加而恶化,但通过增大自发辐射因子,降低自发

辐射寿命可提高其最大调制频率,从而可扩展直接强度调制 ROF 系统的应用范围。

(2) 自发辐射物理量对 THD 和 IMD 的影响,可以通过选择合适的腔结构参数以控制自发辐射物理量,从而达到优化系统性能、降低互调失真影响的目的。而对于采用可调谐 VCSELs 器件的波分复用 ROF 系统,详细分析器件参数对调制的失真影响,通过合理设计器件以控制自发辐射可使系统性能得到提高。

## 参考文献

- [1] Kim A, Joo Y H, Kim Y. 6.0 GHz wireless communication systems with radio-over-fiber links for indoor wireless LANs. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2004, 50 (2) :517
- [2] Capmany J, Ortega B, Martinez A, et al. Multiwavelength single sideband modulation for WDM radio-over-fiber systems using a fiber grating array tandem device. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2005, 17(2) :471
- [3] Huang W, Nakagawa M. Nonlinear effect of direct sequence CDMA in optical transmission. *IEICE Transactions Communication*, 1995, E78-B(5) :702
- [4] Helms J. Intermodulation and harmonic distortions of laser diodes with optical feedback. *J Lightwave Technol*, 1991, 9 (11) :1567
- [5] Wilson G C, Wood T H, Koren U. Integrated electroabsorption modulator/DBR laser linearized by RF current modulation. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1995, 7(12) :1154
- [6] Roselli L, Borgioni V, Zepparelli F, et al. Analog laser pre-distortion for multiservice radio-over-fiber systems. *J Lightwave Technol*, 2003, 21(5) :1211
- [7] Lee H T L, Dalal R V, Ram R J, et al. Dynamic range of vertical-cavity surface-emitting lasers in multimode links. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1999, 11(11) :1473
- [8] Schuh R E, Alping A, Sundberg E. Penalty-free GSM-1800 and WCDMA radio-over-fiber transmission using multimode fibre and 850 nm VCSEL. *Electron Lett*, 2003, 39(6) :512
- [9] Wang Yinglong, Ding Wenge, Zheng Yunlong, et al. Microcavity structure modulation of semiconductor lasers and its pulses transmission in fiber. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002, 23(2) :178 (in Chinese) [王英龙, 丁文革, 郑云龙, 等. 半导体激光器的微腔结构调制及其脉码在光纤中的传输. *半导体学报*, 2002, 23(2) :178]
- [10] Ram R J, Goobar E, Peters M G, et al. Spontaneous emission factor in post microcavity lasers. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8(5) :599

- [11] Biswas T K, McGee W F. Volterra series analysis of semiconductor laser diode. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1991, 3 (8) :706
- [12] Bjork G, Yamamoto Y. Analysis of semiconductor microcavity lasers using rate equations. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27(11) :2386
- [13] Al-Raweshidy H S, Ampem-Darko S O. WCDMA-based radio over fibre system performance with multiple-user interference in multiple service transmission. *Second International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, 2001 :152
- [14] Marozsak T, Kovacs A, Udvary E. Direct modulated lasers in radio over fiber applications. *International Topical Meeting on Microwave Photonics*, 2002 :129
- [15] Carlsson C, Larsson A, Alping A. RF transmission over multimode fibers using VCSELs—comparing standard and high-bandwidth multimode fibers. *J Lightwave Technol*, 2004, 22 (7) :1694
- [16] Zhao Hongdong, Kang Zhilong, Wang Shengli, et al. Microcavity effects in the high modulation response of the vertical cavity surface emitting laser. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52 (1) :77 (in Chinese) [赵红东, 康志龙, 王胜利, 等. 高速调制响应垂直腔面发射激光器中的微腔效应. *物理学报*, 2003, 52 (1) :77]

## 附录

具体参数的计算结果为

$$A = - \frac{q_{sp}}{(P_0 + 1)}$$

$$B = \frac{q}{(P_0 + 1)} \left[ 1 + \frac{sp - P_0 - \frac{sp(P_0 - aN_0)}{P_0 + 1}}{P_0 + 1} \right]$$

$$C = \frac{q(1 - P_0)}{(P_0 + 1)} - \frac{q(P_0 - aN_0)(+1)}{(P_0 + 1)^2}$$

$$D = - \frac{q_{sp}}{(P_0 + 1)^2}$$

$$E = \frac{q}{(P_0 + 1)} \left[ 1 + \frac{sp - P_0 + \frac{2(sp - VN_0)}{(P_0 + 1)^2}}{P_0 + 1} \right]$$

$$F = - \frac{2q(1 + ) (aN_0 - )}{(P_0 + 1)^3}$$

$$L = - \frac{2q_{sp}}{(P_0 + 1)^3}$$

$$M = \frac{2q}{(P_0 + 1)^3} \left[ 1 + + 3 \frac{sp + \frac{3sp(P_0 - aN_0)}{P_0 + 1}}{P_0 + 1} \right]$$

$$N = \frac{6q}{(P_0 + 1)^4} \left[ (1 + ) (1 + aN_0) - sp \right]$$

## Effects of a Microcavity on Harmonic and Intermodulation Distortions of a Vertical Cavity Surface Emitting Laser

Zhang Bo<sup>1,†</sup>, Lü Yinghua<sup>1</sup>, and Zhang Jinling<sup>2</sup>

(1 *Institute of Telecommunication Networks and Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

(2 *School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

**Abstract:** The nonlinear effect of vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) is analyzed using the Volterra transfer function in analog modulation. The effects of the modulation frequency, spontaneous emission factor, and spontaneous emission lifetime on the third harmonic and third-order intermodulation distortions are investigated. The results show that nonlinear effect depends on spontaneous emission parameters. The control of the nonlinear effect, expanding of the modulation frequency, and improvement of performance and application of ROF system based on VCSELs can be achieved by manipulating the spontaneous emission parameters of VCSELs.

**Key words:** radio over fiber; third harmonic; third-order intermodulation; vertical cavity surface emitting laser

**PACC:** 4280S; 4660D; 8160C

**Article ID:** 0253-4177(2006)09-1625-05

---

†Corresponding author. Email: zhbomail@126.com