

文章编号: 0258-7025(2010)10-2460-07

双条形激光器的非线性动力学行为研究

张雅丽 张徐亮 朱伟杰

(电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 610054)

摘要 双条形激光器是一类重要的单片集成式激光器。以激光器速率方程为基础,采用数值分析的方法,研究双条形激光器的非线性动力学行为,讨论它在不同偏置、不同导引机制和初始相位差时的瞬态响应的特点,并指出不稳定性或混沌性是双条形激光器的本征工作状态。无论是无失谐的相位锁定还是相位稳定的双波长输出都经过器件结构的特殊设计,并在一定的工作条件下才能得到。

关键词 激光器;双条形激光器;速率方程;耦合;瞬态响应;自脉动

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103710.2460

Analysis of Nonlinear Dynamic Behaviors for the Twin-Stripe Laser

Zhang Yali Zhang Xuliang Zhu Weijie

(School of Electronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract The twin-stripe laser is an important type of monolithic lasers. Based on the rate equations, the nonlinear dynamic behaviors for the twin-stripe laser are analyzed by the numerical method. The transient responses are elaborately discussed for the twin-stripe laser with two kinds of different guidance mechanisms, and initial phase difference under different bias configurations. It is concluded that the instability/chaos is the intrinsic operation of the twin-stripe laser. Either phase-locked operation without detuning or stable output with two-wavelength only can be obtained under certain running conditions besides the special structure design.

Key words lasers; twin-stripe laser; rate equations; coupling; transient response; self-pulsation

1 引言

由于载波为 60 GHz 的无线通信具有带宽宽、传输速率高、用户间串扰低、保密性好等特点,60 GHz 光纤-无线接入网被认为是非常具有发展前途的一种宽带接入方案^[1]。光毫米波技术是微波光子学领域的热门研究课题^[2~5],其中利用双条形激光器之间的干涉特性产生 60 GHz 载波是一种颇为有效的解决方案。双条形激光器是指在同一芯片上集成有两个激光器的单元阵列,它也是结构最简单的激光器阵列。相对于独立工作的激光器来说,双条形激光器通过两激光器间的侧向耦合相互影响,其动力学过程必然更复杂,如出现自脉动、混沌等一系列瞬态响应。因此,有必要研究双条形激光器复杂的动力学过程,而且双条形激光器的这些非线性动力学行为,还可以为观察非线性系统中的时

空混沌提供丰富的信息。

理论研究指出^[6],在相当大的由激光器耦合系数和注入电流构成的参数空间区域内,线性半导体激光器中的相位锁定在皮秒量级的时域上是不稳定的,表现为即使工作在连续波(CW)方式下,阵列也会出现周期性和混沌的脉动性响应。进一步的分析发现:双条形激光器的大多数行为是非线性的,稳定的工作模式一般有两类:同相(相位差为 0)和反相(相位差为 π),而且在大多数情况下,反相模式优先激射。本文从速率方程模型出发,对双条形激光器的动力学行为进行数值分析,讨论波导模式间的相互耦合与牵引的动力学过程。

2 双条形激光器的耦合速率方程模型

目前普遍采用的双条形激光器的速率方程模型

收稿日期:2009-12-12;收到修改稿日期:2010-02-25

作者简介:张雅丽(1981—),女,博士,讲师,主要从事微波光电器件及半导体器件建模等方面的研究。

E-mail: ylzhang@ee.uestc.edu.cn

是基于 Wang 和 Winful 提出的耦合强度因子 η ^[7, 8] 建立的。实验和理论都表明耦合因子 η 决定着双条形激光器的各种行为, 因此, 双条形激光器的速率方程模型主要是围绕对 η 的修正而发展的。 η 从实数到复数, 从线性化到引入非线性项^[9], 主要考虑到两个激光器间的耦合强度是由消逝场相互作用决定

的, 器件的材料和结构以及制作工艺都影响 η 的形式和强弱。通常 η 为复数, 但对于强折射率导引的激光器中, 它的虚部相对于实部来说几乎可以忽略, 认为它是实数。这里采用 Lamela 等^[10] 建立的速率方程模型, 并考虑自发辐射的影响

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{q_e V_a} - \frac{N_1}{\tau_{sp}} - \left[\frac{1}{\tau_{ph}} + \Gamma g_0 (N_1 - N_{th}) \right] S_1, \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{I_2}{q_e V_a} - \frac{N_2}{\tau_{sp}} - \left[\frac{1}{\tau_{ph}} + \Gamma g_0 (N_2 - N_{th}) \right] S_2, \quad (2)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = \Gamma g_0 (N_1 - N_{th}) S_1 + \Gamma \gamma \frac{N_1}{\tau_{sp}} - 2 \sqrt{S_1 S_2} \eta_r \sin \theta - 2 \sqrt{S_1 S_2} \eta_i \cos \theta, \quad (3)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = \Gamma g_0 (N_2 - N_{th}) S_2 + \Gamma \gamma \frac{N_2}{\tau_{sp}} + 2 \sqrt{S_2 S_1} \eta_r \sin \theta - 2 \sqrt{S_2 S_1} \eta_i \cos \theta, \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{g_0 \alpha}{2} (N_2 - N_1) + \eta_r \cos \theta \left(\sqrt{\frac{S_1}{S_2}} - \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} \right) + \eta_i \sin \theta \left(\sqrt{\frac{S_1}{S_2}} + \sqrt{\frac{S_2}{S_1}} \right), \quad (5)$$

$$N_{th} = \frac{1}{\Gamma g_0 \tau_{ph}} + N_t, \quad (6)$$

其中(1)和(2)式右边的三项分别表示由注入电流产生的载流子密度增加、由载流子寿命决定的载流子密度减少和由受激辐射引起的载流子密度减少;(3)和(4)式右边四项分别表示受激辐射引起的光子密度增加、自发辐射引起的光子密度增加和光子寿命引起的光子密度减少, 以及以耦合强度因子的形式出现的耦合项引起的光子密度变化。式中 N_j 和 S_j ($j = 1, 2$) 分别为载流子密度和有源区内光子密度, N_{th} 为阈值载流子密度, N_t 为透明载流子浓度, I_j ($j = 1, 2$) 分别为注入在第 j 个激光器中的电流。 τ_{sp} 和 τ_{ph} 表示载流子和光子的寿命, Γ, g_0 分别为光场限制因子和微分增益, γ 为自发辐射因子, α 为线宽增强因子(又称为折射率反导引因子), 从(5)式中也可以清楚地看出它的作用: α 值越大, 两激光器间相位差 θ 的变化越快, 即大的 α 增强了两激光器间相位差 θ 的波动, 从而使阵列趋于不稳定, 或稳定性变差。 V_a 为有源区的体积, q_e 为电子电荷。两激光器之间的耦合由耦合强度因子 η 的实部 η_r 和虚部 η_i 构成, 复数 η 为载流子诱发的反波导效应和由增益波导引起的弯曲波前效应的唯象表示, $\eta = \kappa c / n$, 在强折射率导引的半导体激光器中, η 的虚部近似为零或与实部相比可以忽略。 κ 为两激光器波导腔的耦合系数, 与波导的结构有关, c 为真空中的光速, n 为群折射率。

在讨论过程中, 考虑自发辐射耦合入激光器模

式的效应, 但不考虑增益饱和效应, 并认为载流子相互之间没有注入, 即激光器间的电隔离很理想, 也不考虑载流子互扩散的影响^[11]。

3 双条形激光器动力学行为及结果分析

依据耦合速率方程模型分析双条形激光器的动力学行为。首先从静态平衡分析开始, 讨论其工作的稳定性; 然后进行数值分析, 讨论双条形激光器系统的瞬态响应。

3.1 静态解析分析

假设两个激光器结构完全对称, 偏置在相同的电流下(即对称偏置, $I_1 = I_2$), 且 $N_1 = N_2, S_1 = S_2$, 此时

$$\sin \theta = 0 \quad (\theta = 0, \pi), \quad (7)$$

$$N_{0,1} = N_{0,2} = N_{th} + [2\eta_i \cos \theta / (\Gamma g_0)], \quad (8)$$

$$S_{0,1} = S_{0,2} = \frac{I_0}{q_e V_a} - \frac{N_{th} + [2\eta_i \cos \theta / (\Gamma g_0)]}{\frac{\tau_{sp}}{1/\tau_{ph} + 2\eta_r \cos \theta}}. \quad (9)$$

可以看出, 此时静态平衡点不含有耦合强度因子的实部 η_r , 只与耦合强度因子的虚部 η_i 有关; 相位条件(7)式表明有两个可能的平衡点, 分别对应同相模($\theta=0$)和反相模($\theta=\pi$)。采用 Lamela 等的假定^[12], 认为光子密度大的模式为主模。由(9)式可

以看出,完全对称的双条形激光器在对称偏置下, $\eta_i < 0$ 时的主模是同相模,即此时相比同相模来说,反相模可认为几乎是不存在的;而 $\eta_i > 0$ 时的主模是反相模,同相模可认为几乎是不存在的。

实际上,即使器件结构完全相同,注入的电流偏置也完全一样时,两个激光器的输出也不会完全一样,即 $N_1 \neq N_2, S_1 \neq S_2$,此时激光器系统有唯一确定的一组静态平衡解,但并不一定相互锁定;两个激光器有着不一样的波长输出,即存在一定的频率差。由于实际的器件结构并不可能完全对称,在不同的电流偏置下,对速率方程组的分析结果表明,此时双条形激光器系统仍有稳定解存在,只是其解析解更复杂一些,直观意义不是很明显。

3.2 动力学行为的数值分析

数值分析双条形激光器的动力学行为,主要是研究其载流子浓度、光子密度和相位差的时间变化特性,是对其耦合速率方程进行积分(四阶龙格-库塔法)。过程中采用的参数是激光器的一组自治参数,如表1所示。

根据激光器的两类导引机制(增益导引或折射率导引)、偏置状态和初始相位的设置,分别考虑强折射率导引和增益导引的情况:即强折射率导引时,

表1 有源区基本参数

Table 1 Fundamental parameters of active region

Parameter	Value
Group index n_g	3.6
Optical confinement factor Γ	0.6
Group velocity $v_g / (10^{14} \mu\text{m/s})$	8.328
Active thickness $d / \mu\text{m}$	0.2
Vacuum wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	0.9
Ridge width $w / \mu\text{m}$	2
Differential gain $g_0 / (10^{-6} \text{cm}^3/\text{s})$	1.12
Carrier density at transparency $N_t / (10^{18} \text{cm}^{-3})$	1.1
Spontaneous emission factor $\gamma / 10^{-5}$	1
Spontaneous radiative recombination lifetime $\tau_{sp} / (10^{-9} \text{s})$	4
Stimulated recombination section $a / (10^{-16} \text{cm}^2)$	1.35
Photon lifetime $\tau_{ph} / (10^{-12} \text{s})$	2.395
Line-width enhancement factor α	5
Cavity length $l / \mu\text{m}$	300
Quantity of electricity $q_e / 10^{-16}$	1.6
Active volume $V_a / \mu\text{m}^3$	120

耦合速率方程组中的虚部项为零;增益导引时,对不同强度的耦合因子虚部进行讨论,共分8种情况来讨论双条形激光器的瞬态响应。图中“#1”和“#2”

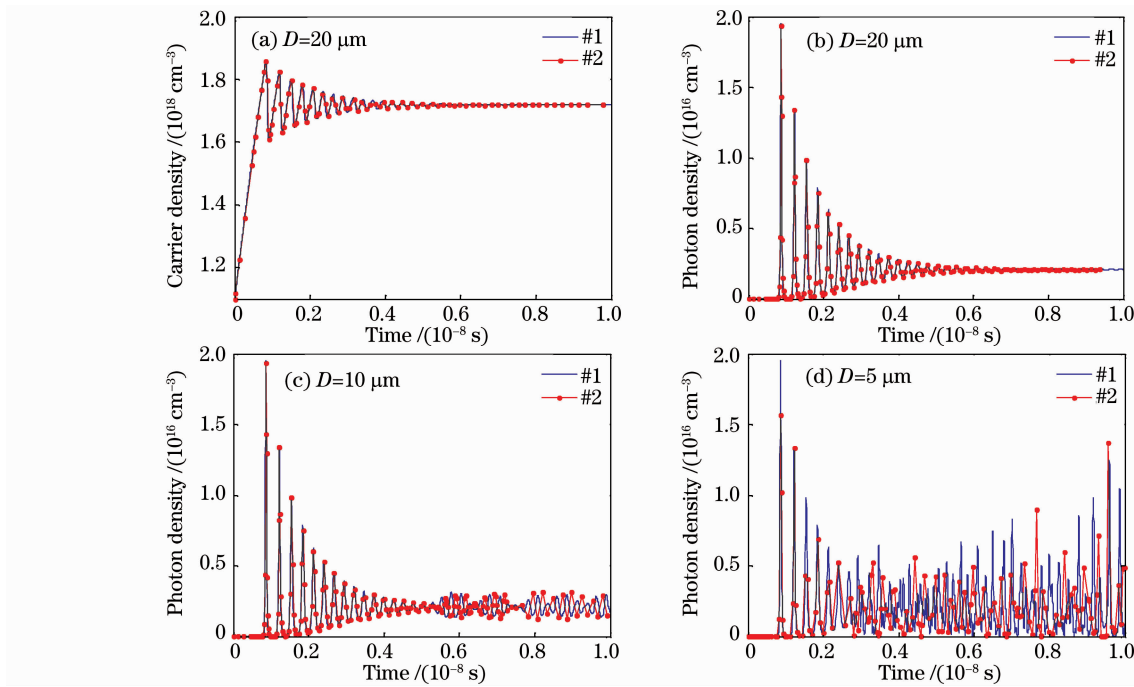


图1 对称电流偏置下,不同间隔 D 时的折射率导引双条形激光器的瞬态响应

(a), (b) 弱耦合系统; (c) 中强耦合系统; (d) 强耦合系统

Fig. 1 Transient response of a twin-stripe index-guided laser with different distance D , when a symmetric current is applied. (a), (b) weakly coupled system; (c) less strongly coupled system; (d) strongly coupled system

代表双条形激光器中的两支激光器。初始值($t=0$ 时刻)设置为:

1) 载流子浓度为透明载流子浓度 N_t ; 光子密度为 $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$;

2) 初始相位差为 π (初始反相)或 0 (初始同相); 系统均偏置在直流工作态。

3.2.1 初始反相: 强折射率导引 $k_i=0$, 对称电流偏置 $I_1=I_2=25 \text{ mA}$

根据不同间隔 D 时的双条形激光器的瞬态响应, 将激光器间的耦合分成弱耦合、中强耦合和强耦合。弱耦合系统有稳定的瞬态响应, 如图 1(a), (b) 所示; 中强耦合系统的响应表现为不稳定的自脉动,

如图 1(c) 所示; 强耦合系统的响应振荡剧烈, 如图 1(d) 所示。图 1 表明, 随着间隔距离 D 的减小, 双条形激光器间的耦合减弱, 响应由稳定态转为不稳定, 载流子密度和光子密度在某一平衡值附近波动, 这是因为系统耦合系数的虚部为零, 系统变得不再稳定, 相位差变得不再恒定。

3.2.2 初始反相: 强折射率导引 $k_i=0$, 非对称电流偏置 $I_1=15 \text{ mA}, I_2=20 \text{ mA}$

具体响应如图 2 所示:

1) 对于不同的 ΔI , 双条形激光器具有类似的响应, 这里以 $I_1=15 \text{ mA}, I_2=20 \text{ mA}$ 为例;

2) 与对称偏置类似, 中等强度耦合阵列的光子

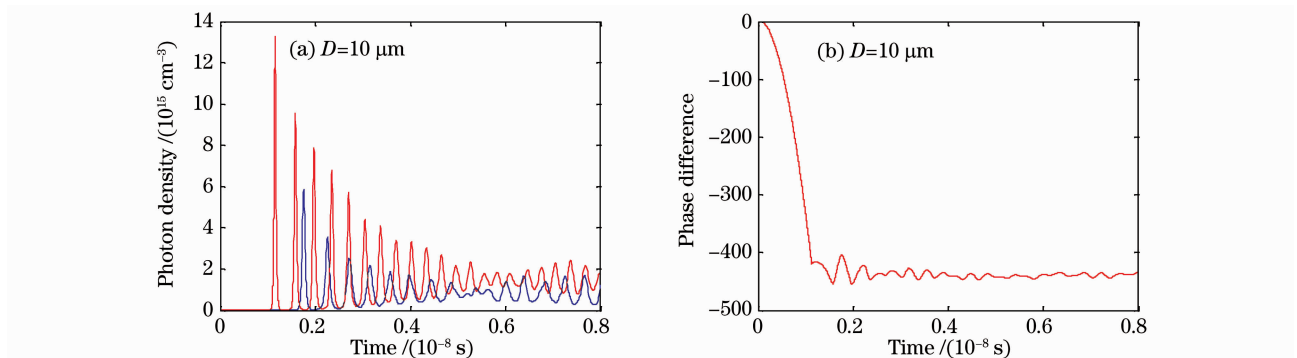


图 2 非对称电流偏置下折射率导引双条形激光器的瞬态响应。(a) 光子密度响应, (b) 相位差响应
Fig. 2 Transient response of a twin-stripe index-guided laser, when an asymmetric current is applied

(a) photon density, (b) phase difference

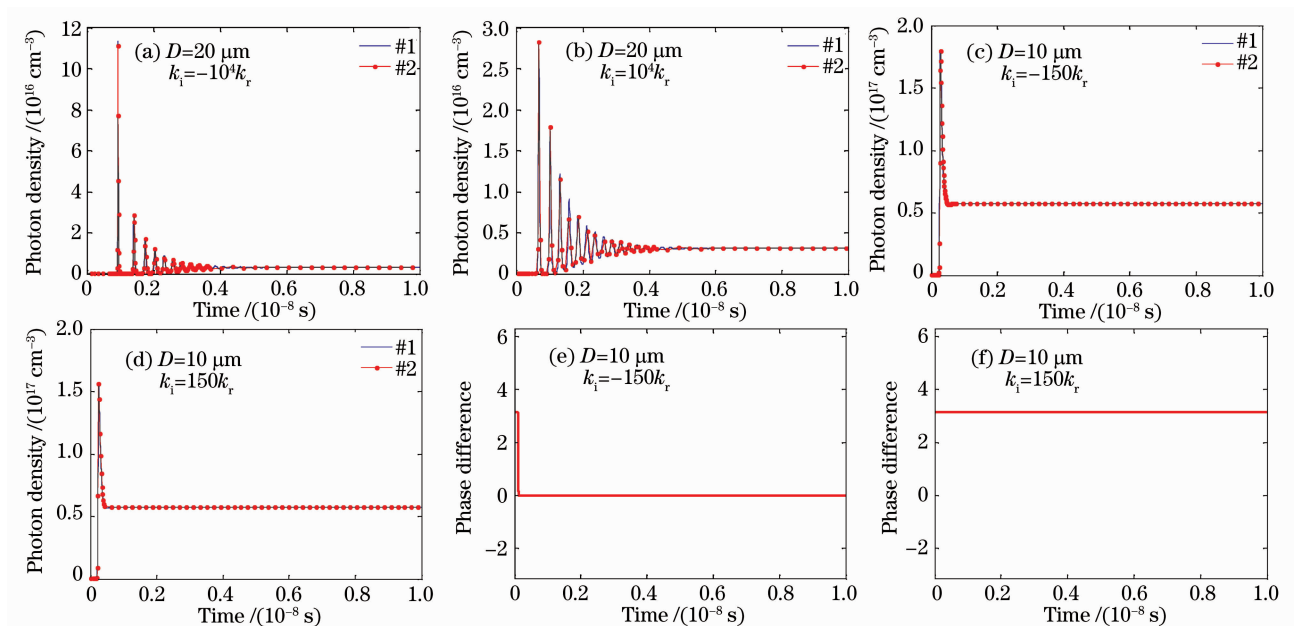


图 3 对称电流偏置下, 不同耦合强度因子虚部时, 增益导引双条形激光器的瞬态响应

(a)~(d) 耦合强度因子虚部符号相反时的光子密度; (e), (f) 在 (c), (d) 情况下的相位差

Fig. 3 Transient response of a twin-stripe gain-guided laser with different imaginary parts of coupling coefficient, when a symmetric current is applied. (a)~(d) photon density with opposite sign of imaginary parts of coupling coefficient; (e), (f) phase difference of the condition on (c) and (d)

密度响应没有趋于恒定,而是在某一平衡值附近波动;与对称偏置不同的是,相位差在经过一个大的跳变之后,虽不是定值,但保持在某一平衡值附近波动,而且这一平衡值虽与偏置差 ΔI 的大小有关,但没有线性规律。

3.2.3 初始反相:增益导引 $k_i \neq 0$, 对称电流偏置 $I_1 = I_2 = 25$ mA

响应如图 3 所示:

1) 对大小相等、符号相反的 k_i , 增益导引双条形激光器虽有相似的响应,但相位差的时变特性却

不同:对于负的 k_i , 系统相位差发生瞬间跳变后稳定在 0 处,如图 3(a)所示;而正的 k_i , 系统相位差一直稳定在 π 处,如图 3(b)所示;

2) 当耦合强度因子的虚部不为零且在一定范围内,弱耦合双条形激光器系统能有稳定的响应,如图 3(c),(d)所示;相比虚部为零的情况,此时系统稳定性变强,且有稳定的相位差(包括跳变后稳定),如图 3(e),(f)所示。因此,在系统中引入适当的增益耦合,可以改善系统的稳定性。

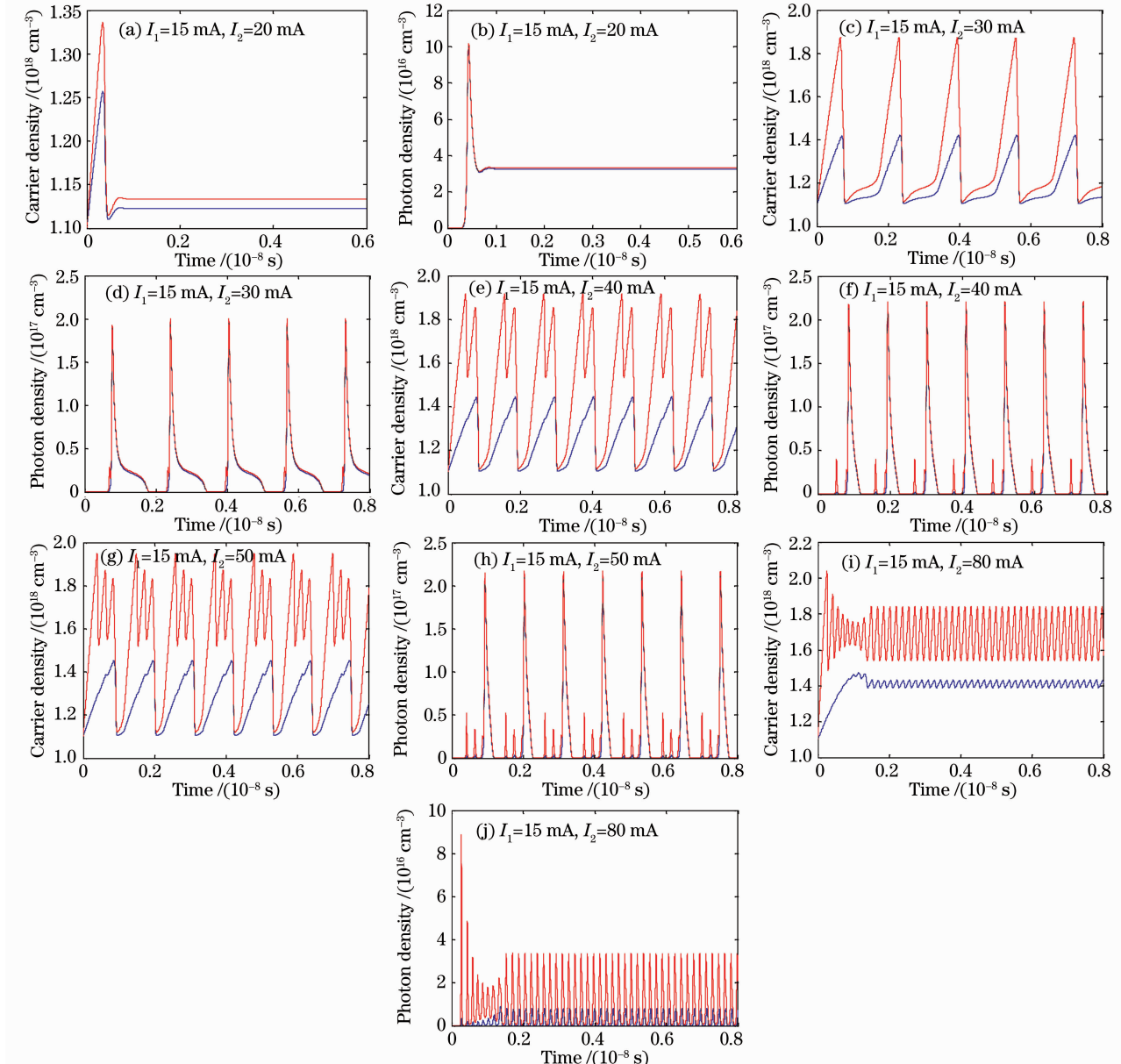


图 4 非对称电流偏置下增益导引双条形激光器的瞬态响应

(a), (c), (e), (g), (i) 不同偏置电流时的载流子密度响应; (b), (d), (f), (h), (j) 不同偏置电流时的光子密度响应

Fig. 4 Transient response of a twin-stripe gain-guided laser, when the different asymmetric current is applied. (a), (c), (e), (g), (i) carrier density when in different asymmetric currents; (b), (d), (f), (h), (j) photon density when in different asymmetric currents

3.2.4 初始反相:增益导引 $k_i \neq 0$,非对称电流偏置
当 $D=10 \mu\text{m}$, $k_i = -150k_r$ 时,系统的具体响应
如图 4 所示:

1) ΔI 不是很大时,双条形激光器的瞬态响应
趋于稳定,如图 4(a),(b)所示;随着 ΔI 的增大,响
应出现自脉动现象,如图 4(c),(d)所示; ΔI 继续增
加,光子和载流子响应的自脉动现象继续维持,只是
在每次脉动出现小尖峰,且峰数逐渐增多,如图 4
(e)~(h)所示;随后,小峰间的差别消失,过渡为均
匀的脉动,如图 4(i),(j)所示;从图 4(a)~(j)可以
看出, ΔI 越大,自脉动的频率越高。

2) 随着 ΔI 的增大,相位差出现多变的响应:如
跳变稳定式,见图 4(a),(b)所示,台阶式,如图 4
(c)~(h)所示等。

3) 两个电流偏置中的小的那个电流(I_1)越大,
出现上述现象响应的 ΔI 也越大。

3.2.5 对于初始同相时的双条形激光器瞬态响应
的讨论

从与初始反相时对应的四类情况进行对比的角
度,对于初始同相状态讨论如下:

1) 强折射率导引 $k_i = 0$,对称电流偏置 $I_1 =$
 $I_2 = 25 \text{ mA}$ 时:与初始反相的瞬态响应不同,随着间
隔逐渐减小即耦合越来越强,双条形激光器系统的
响应情况基本不变,都能有稳定的动态平衡;而且相
位差一直稳定在 0 处。

2) 强折射率导引 $k_i = 0$,非对称电流偏置与初
始反相类似,系统瞬态响应在一段时间之后,相位差
经历一激烈跳变之后,在某一平衡值附近波动。

3) 增益导引 $k_i \neq 0$,对称电流偏置 $I_1 = I_2 =$
 25 mA 时,与初始反相时类似,对于大小相等、符号
相反的 k_i ,在某 k_i 区间段,增益导引双条形激光器
都有相似的响应;与初始反相时不同,相位差不出现
瞬间跳变的现象,而是一直稳定在 0 处。

4) 增益导引 $k_i \neq 0$,非对称电流偏置时,载流子
和光子的响应规律同初始反相的情况类似;不同的
是相位差的瞬态响应,除了有和初始反相时一样的
跳变稳定式、台阶式的响应外,还出现了稳定在初始
相位差为 0 处的响应。

4 结 论

从阵列激光器的速率方程模型出发,静态分析
了双条形激光器系统的稳定性,数值分析了系统的
动力学行为。根据阵列激光器的导引机制、偏置状
态和初始相位差,分 8 种情况讨论了双条形激光器

的瞬态响应过程,展示了其复杂多变的非线性动力
学过程。根据双条形激光器的动态行为特点,将两
激光器间的耦合分为三类:弱耦合、中强耦合及强耦
合;在相同的偏置条件下,增益导引机制使得系统的
响应变得更复杂,激光器阵列出现了新的特性,表现
在对称电流偏置时,增益导引激光器阵列有更大范
围的“弱耦合区”,即间距 D 比较小时也能有稳定
的响应;非对称电流偏置时,载流子和光子出现自
脉动,相位差出现了多变的响应,如跳变稳定式、台
阶式等响应。

器件工作特性的理论分析能预测实际应用时的
各种现象,对器件的实际制作有重要的指导意义。
对双条形激光器动力学过程的分析表明,不稳定性
或混沌性是双条形激光器本征的内在工作状态,无
论是无失谐的相位锁定还是双波长输出的相位稳
定,都不仅需要经过器件结构的特别设计,还要满
足一定的工作条件才能出现工作状态,包括偏置电
流的调制以及其他外界条件的引入等。

参 考 文 献

- Jiang Tao, Huang Dexiu, Zhang Xinliang *et al.*. A full-duplex 60 GHz-band radio over fiber system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):36~42
江涛,黄德修,张新亮等.全双工 60 GHz 的光纤无线通信系统[J].*光学学报*, 2008, **28**(1):36~42
- Lei Xiaoyan, Dong Ze, Pi Yazhi *et al.*. Performance of a novel scheme to generate single-sideband millimeter-wave signals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4):889~893
雷小燕,董泽,皮雅雅等.一种新型的单边带调制技术[J].*中国激光*, 2009, **36**(4):889~893
- Liu Limin, Dong Ze, Pi Yazhi *et al.*. Radio-over-fiber system for frequency-quadrupled millimeter-wave generation by external modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1):148~153
刘丽敏,董泽,皮雅雅等.采用外调制器产生四倍频的光载毫米波光纤无线通信系统[J].*中国激光*, 2009, **36**(1):148~153
- Hu Liliang, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-sideband modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2):238~242
胡黎亮,陈林,余建军等.一种改进的双边带调制产生光毫米波的方案[J].*光学学报*, 2008, **28**(2):238~242
- Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):481~488
方祖捷,叶青,刘峰等.毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J].*中国激光*, 2006, **33**(4):481~488
- H. G. Winful. Nonlinear dynamics of semiconductor laser arrays [C]. LEOS'96, 1996, **2**:290~291
- S. S. Wang, H. G. Winful. Dynamics of phase-locked semiconductor laser arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **52**(21):1774~1776
- H. G. Winful, S. S. Wang. Stability of phase locking in coupled semiconductor laser arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(20):1894~1896

-
- 9 P. C. De Jagher, D. Lenstra. The twin stripe laser: a non-linear term in the coupling coefficient [C]. *SPIE*, 2004, **5452**: 613~624
 - 10 H. Lamela, M. Leonés, G. Carpintero *et al.*. Analysis of the dynamic behavior and short-pulse modulation scheme for laterally coupled semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2):192~200
 - 11 P. Ru, P. K. Jakobsen, J. V. Moloney *et al.*. Generalized coupled-mode model for the multistriple index-guided laser arrays [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(3):507~515
 - 12 H. Lamela, P. Acedo, G. Carpintero *et al.*. Instabilities and dynamic behavior in a two lateral coupled semiconductor laser array [C]. *SPIE*, 1994, **2146**:288~298