

高光反馈水平下光回馈传感器的模拟行为模型

臧方月¹, 叶会英¹, 李双阳²

(1. 郑州大学信息工程学院, 河南 郑州 450052; 2. 浙江大学竺可桢学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:基于 Cadence 公司的 orcad10.5 提出一种模拟行为模型来描述高光反馈水平下(适度光反馈水平和强光反馈水平)光回馈自混合干涉现象,该方法减化了光回馈自混合干涉现象中非线性方程的求解过程。不仅建立了高光反馈水平下光回馈传感器的模拟行为模型,搭建了软硬件结合的平台,同时也提供了一种对目标位移、速度、距离等进行测量的新的数据处理方法。

关键词:半导体激光器;光回馈自混合干涉;模拟行为模型;orcad

中图分类号:TN248.4 **文献标识码:**A

Behavioral model of an optical feedback sensor based on high optical feedback

ZANG Fang-yue¹, YE Hui-ying¹, LI Shuang-yang²

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;

2. Chu Kochen Honors College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In this paper, a new behavioral model of high optical feedback (moderate and strong optical feedback) based on orcad 10.5 of cadence is proposed to represent the optical feedback self-mixing phenomenon and to simplify the solution of nonlinear equations involved in this problem. At the same time, it not only establish an behavior model of the optical feedback sensor and build a platform to combine hardware and software, but also develop new methods for signal processing of target measurements such as displacement, velocity and distance.

Key words: semiconductor lasers; optical feedback self-mixing interferometry; behavioral model; orcad

1 引言

光回馈自混合干涉是指激光器的一部分输出光被外部物体反射或散射后,又反馈回激光器的谐振腔内,反馈光携带外部物体的信息,与激光腔内的光相混合,从而改变了激光器的输出功率,因干涉信号与传统的双光束干涉有相似之处,故称之为光回馈自混合干涉或简称自混合干涉(Self-mixing interferometry)^[1]。国内外学者对该效应的研究已经有40多年的历史,研究结果表明该技术在位移、振动、速度(固体、液体)等的测量及激光器自身参数的测量等方面应用前景光明^[2-4]。由于该测量系统装置较传统的干涉装置紧凑、易准直、价格低并且能够给出目标物体的移动方向,因此该技术能够在工业应用上发挥很大作用。

光回馈自混合干涉效应随着反馈水平的不同分

为不同的反馈机制^[5]。弱光反馈下(耦合强度约-90 dB或反馈水平因子 $C < 1$),干涉信号波形和传统干涉信号类似,但是随着反馈水平的增加分为适度光反馈(耦合强度约-50 dB或 $1 < C < 4.6$)与强光反馈(耦合强度约-39 dB或 $C > 4.6$)。滞回现象、相干猝灭现象等非线性物理现象也影响自混合干涉信号的波形,使测量模型及后续信号处理变得相当复杂。这些因素限制了自混合干涉技术的应用。本文提出一种模拟行为模型来模拟自混合现象,该模型减化了自混合干涉模型中非线性方程的求解。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60871031)资助。

作者简介:臧方月(1984-),女,硕士研究生,主要研究方向为激光测量,新型传感理论与技术。E-mail:fangyue0163@163.com

收稿日期:2010-12-21

2 基本理论

目前对自混合干涉效应的分析有两种不同但等效的数学模型^[6]:三镜腔法和 Lang - Kobayashi 等式法。这两种方法都可以利用以下方程组给出相同的描述:

$$x_0(t) = x_F(t) + C \cdot \sin[x_F(t) + \arctan(\alpha)] \tag{1}$$

$$G(x_F(t)) = \cos(x_F(t)) \tag{2}$$

$$P(t) = P_0 \{1 + m \cos[x_F(t)]\} \tag{3}$$

其中, $x_F(t)$ 为有光反馈时外腔光相位; $x_0(t)$ 为无光反馈时外腔光相位; 它们分别是有光反馈和无光反馈时激光器输出光波波长 λ_F 和 λ_0 的函数:

$$x_0(t) = 2\pi \frac{D(t)}{\lambda_0(t)} = 2\pi\nu_0(t)\tau(t) \tag{4}$$

$$x_F(t) = 2\pi \frac{D(t)}{\lambda_F(t)} = 2\pi\nu_F(t)\tau(t)$$

式中, τ 为激光在外腔的往返时间 ($\tau = 2D/c$); D 为外腔的长度变化量; 也就是外部物体的位移; c 为光速; $\nu_F(t)$, $\nu_0(t)$ 分别是有光反馈和无光反馈时的频率; C 为光反馈水平因子; α 为半导体激光器的线宽展宽因子, 即 LEF; m 为调制系数; $P(t)$ 和 P_0 分别是有外腔和无外腔时半导体激光器的输出功率; $G[x_F(t)]$ 是干涉函数, 体现了外腔光相位对激光输出功率的影响。

2.1 原理分析

构造模拟行为模型时, 首先要画出被测物理量与干涉信号之间数据转换的原理框图, 也就是找出位移量 $D(t)$ 和自混合干涉信号 $G[\cdot]$ 之间的关系。即需要将方程式 (1) ~ (3) 表示成一些常用模拟元器件和一些功能框图的形式。首先由公式 (4) 可以把输入信号 (也就是外部物体位移) 转换成无光反馈时的外腔光相位, 这样就把外部物体的位移和整个光反馈系统联系起来; 由式 (1) 可定义单射函数 $G[x_F(t); C, \alpha]$, 表示为:

$$x_0(t) = x_F(t) + C \cdot \sin[x_F(t) + \arctan(\alpha)] = G[x_F(t); C, \alpha] \tag{5}$$

但是, 该单射函数并不是实际的功能函数, 需要一个新的函数来表示 $x_0(t)$ 和 $x_F(t)$ 之间的因果关系。由 $G[x_F(t); C, \alpha]$ 的反函数 $F[x_F(t); C, \alpha]$ 来表示:

$$x_F(t) = F[x_0(t); C, \alpha] = G^{-1}[x_0(t); C, \alpha] \tag{6}$$

可见, 关键就是找出函数 $F[x_F(t); C, \alpha]$, 也就是由无光反馈下的光相位得出有光反馈下的光相

位, 这也是本论文要解决的核心问题。再由式 (2) 即取 $x_F(t)$ 的余弦函数就可得出自混合干涉函数 $G[x_F(t)]$, 即输出信号。式 (3) 表示有光反馈时激光器的输出功率和自混合干涉函数之间的关系, 其中, 调制系数的典型值 $m \approx 10^{-3}$ 。

综上所述可以画出整个电路总的功能框图, 如图 1 所示。其中, 模块 (1) 是一个乘法器模块, 输出等于输入乘以乘法器的参数 (如 $4(\pi/\lambda_0)$); 模块 (2) 是实现 $F[x_F(t); C, \alpha]$ 函数的功能模块, 分为 $C < 1$, $C > 1$ 两种情况, 将 $x_F(t)$ 表示成 $x_0(t)$ 的函数的形式, 本文主要研究 $C > 1$ (高光反馈水平下) 时的情况, 这也是本文的重点, 下面将具体介绍; 模块 (3) 是一个余弦函数模块, 将输入函数取余弦就得到输出函数; 模块 (4) 是一个加法器模块, 输出等于两输入之和。

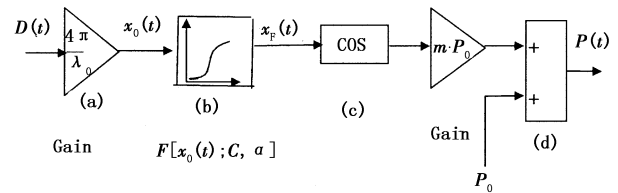


图1 光回馈传感器信号传输的功能框图

图 2 为不同光反馈水平下函数 $F[x_F(t); C, \alpha]$ 的曲线图, 可以看出只有当 $C < 1$ 时 $x_0(t)$ 和 $x_F(t)$ 之间是单一映射的关系, 当 $C > 1$ 时, 函数 $F[x_F(t); C, \alpha]$ 将不可逆, 出现滞回现象。因此以光反馈水平因子 (C) 为依据, 将研究过程分为 $C < 1$, $C > 1$ 两种境况来讨论, 本文对 $C > 1$ 的情况进行研究。

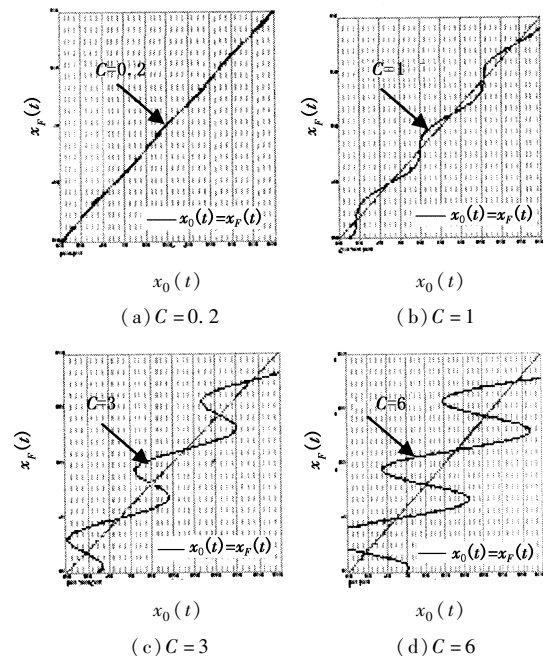


图2 C=0.2, C=1, C=3 和 C=6 时函数 $F[x_F(t); C, \alpha]$ 的曲线图

2.2 高光反馈水平下光回馈传感器的模拟行为模型

正如前面所说的,当 $C > 1$ 时,分为适度光反馈和强光反馈,随着光反馈水平的增加,激光器将产生两种主要的非线性物理现象:滞回现象和相干猝灭现象。图 3(a)所示是以 $x_0(t)$ 来表示 $x_F(t)$ 的曲线图。从图中可以看出,如果初始相位 $x_F(0)$ 在区间 $[x_{F,F}(k-2), x_{F,R}(k)]$ 内,则在区间 $[x_{0,F}(k-2), x_{0,R}(k)]$ 内任取 $x_0(t)$ 时,也一定可以在区间 $[x_{F,F}(k-2), x_{F,R}(k)]$ 内找到相应的 $x_F(t)$;如果 $x_0(t)$ 逐渐增大超过了 $x_{0,R}(k)$,则 $x_F(t)$ 出现明显的跳变,但是在区间 $[x_{0,F}(k), x_{0,R}(k+2)]$ 内任取 $x_0(t)$ 仍可以在新的区间 $[x_{F,F}(k), x_{F,R}(k+2)]$ 内找到相应的 $x_F(t)$ 。

相位 $x_{0,R}(k)$ 和 $x_{0,F}(k)$ 对应于函数 $F[x_F(t); C, \alpha]$ 斜率无穷大处的相位值,分别为上跳变点和下跳变点。为了确定 $x_{0,R}(k)$ 和 $x_{0,F}(k)$ 就要先找出 $x_{F,R}(k)$ 和 $x_{F,F}(k)$ 的值。下面对公式(1)关于 $x_F(t)$ 求导,并且令其导数为零。即:

$$\frac{dx_0(t)}{dx_F(t)} = 1 + C \cdot \cos[x_F(t) + \arctan(\alpha)] = 0 \tag{7}$$

则:

$$x_{F,R}(k) = k\pi - \arctan(\alpha) + \beta$$

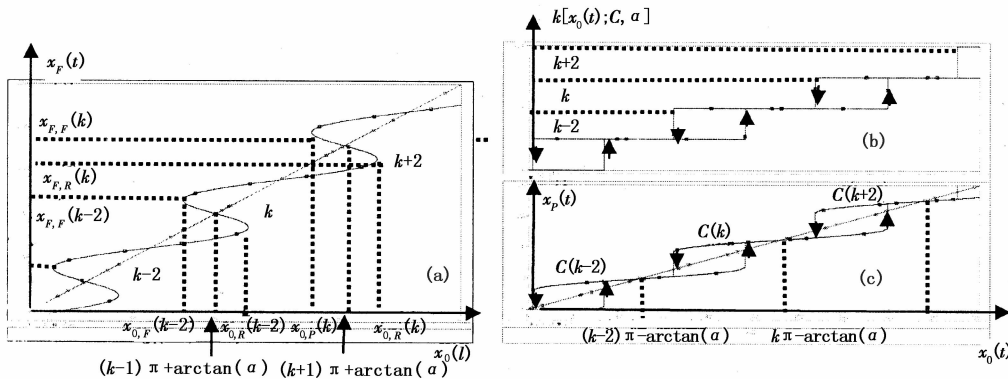


图 3(a) $C = 3$ 时函数 $F[x_F(t); C, \alpha]$ 的仿真波形; (b) 函数 $k[x_0(t); C, \alpha]$ 仿真波形, 明显存在滞回现象; (c) 经过查表程序查表之后求出的 $x_0(t)$ 和 $x_F(t)$ 之间的关系图, 也明显存在滞回现象

曲线 $C(k)$ 关于坐标点 $[x_0(t) = k\pi - \arctan(\alpha), x_F(t) = k\pi - \arctan(\alpha)]$ 对称, 并且有:

$$x_{0,F}(k) \leq x_0(t) \leq x_{0,R}(k) \tag{11}$$

即:

$$-\beta - C\sin(\beta) \leq x_0(t) - k\pi + \arctan(\alpha) \leq \beta + C\sin(\beta) \tag{12}$$

$$x_{F,F}(k) = (k+2)\pi - \arctan(\alpha) - \beta \tag{8}$$

其中, k 为偶数。

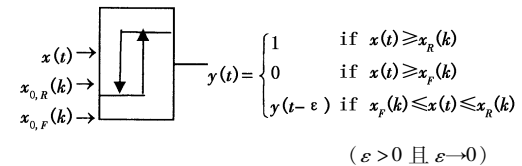
$$\beta = \arccos(-1/C) \tag{9}$$

代入公式(1)就可得到:

$$x_{0,R}(k) = k\pi - \arctan(\alpha) + \beta + C\sin(\beta)$$

$$x_{0,F}(k) = (k+2)\pi - \arctan(\alpha) - \beta - C\sin(\beta) \tag{10}$$

$C > 1$ 时的隐函数 $F[.]$ 的曲线图如图 3(c) 所示。曲线可以分成 $C(k-2), C(k), C(k+2), \dots$, 一系列分段曲线。给定 $x_0(t)$, 可以先找出当前的 k 值, 就能确定当前的曲线段 $C(k)$ 。对当前 k 值的求取可以通过一系列触发器模块求得。每一个触发器模块的输出都是在 0 (低电平) 和 1 (高电平) 之间转换, 当 k 值为高电平时, 输出一直保持高电平, 直到输入值低于 $x_{0,F}(k)$; 当 k 值为低电平时, 输出一直保持低电平, 直到输入高于 $x_{0,R}(k)$, 可以表示为:



$k[x_0(t); C, \alpha]$ 曲线如图 3(b) 所示。

因此, 对于给定的曲线段 $C(k)$ 它的相位输出就一定在区间 $[x_{F,F}(k-2), x_{F,F}(k)]$ 上。

则有:

$$-\beta \leq x_F(t) - k\pi + \arctan(\alpha) \leq \beta \tag{13}$$

式(14)所表示的隐函数 $y = f(x; C)$, 在区间 $[-\beta - C\sin(\beta), \beta + C\sin(\beta)]$ 内任意的 x 都能通过

内插程序得出。

另外,为了对隐函数 $G(\cdot)$ 求解,令:

$$x = x_0(t) + \arctan(\alpha)$$

$$y = x_F(t) + \arctan(\alpha)$$

代入公式(1)得到隐函数:

$$x = y + C\sin(y) \tag{14}$$

记为函数 $y=f(x;C)$, 每一段曲线 $C(k)$ 都能由非线性函数 $y=f(x;C)$ 得到。这样,在区间 $[-\beta,\beta]$ 内取出一系列线性等间距的抽样点 y_s 它所对应的一组抽样点 x_s 就能很容易的得出,也能够很容易的绘出它们之间的关系曲线,如图4所示。有了抽样点组 $[x_s, y_s]$, 通过线性内插法可以查表得出任意给定的 x 所对应的 y 值。可以表示为:

$$y=f(x;C) \approx f_{INT}(x; x_s; y_s; C) \tag{15}$$

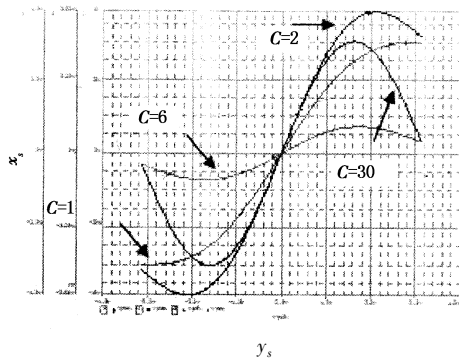


图4 分别为 $C=1, 2, 6$ 和 30 时, 函数 $x_s = y_s + C\sin(y_s)$ 的曲线

综合以上的分析就可以得出隐函数 $F[\cdot]$ 的功能框图,如图5所示。

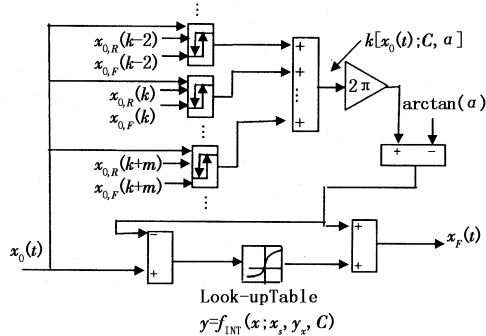


图5 高光反馈水平下函数 $F[x_F(t); C, \alpha]$ 的功能框图

3 模拟行为模型的仿真

根据上述理论结果利用 PSPICE 对不同 C 值下的模拟行为模型进行仿真。假定外部物体的振动频率为 $f=100\text{ Hz}$, 峰峰值为 $6\lambda_0$, $\lambda_0 = 785\text{ nm}$, 为日立公司的 HL7851G 激光器的波长。 $C=3, \alpha=5$ 时, 位移 $D(t)$ 的波形, 如图6(a)所示; 有光反馈和无光反

馈相位 $x_0(t)$ 和 $x_F(t)$ 的波形如图6(b)所示; 自混合干涉函数的仿真波形如图6(c)所示。

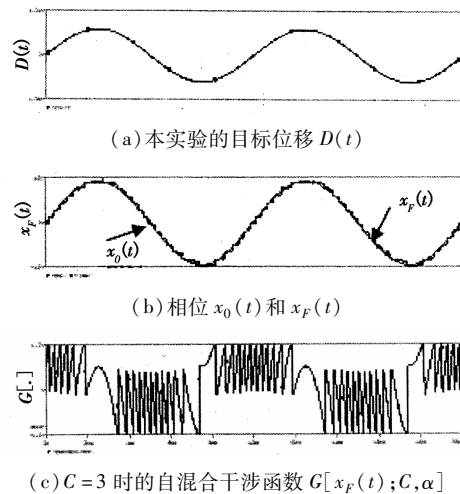
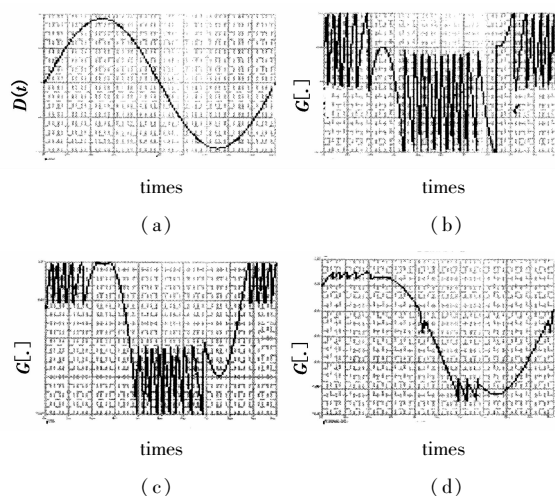


图6 高光反馈水平下的仿真波形

图7是反馈水平因子 C 分别为 $3, 6$ 和 30 时输出自混合干涉函数 $G[x_F(t); C, \alpha]$ 的仿真波形, 如图7(a)所示目标位移 $D(t)$ 的波形; 如图7(b)所示 $C=3, \alpha=5$ 时的波形, 自混合信号为类锯齿波, 由于该反馈机制下激光管处于双稳态, 波动的正反行程所对应的自混合信号出现跳变现象; 如图7(c)所示 $C=6, \alpha=5$ 时的波形, 如图7(d)所示 $C=30, \alpha=5$ 时的仿真波形, 此时某些干涉条纹消失, 出现相干猝灭现象, 随着 C 的增加相干猝灭现象越明显。如图8所示高光反馈水平下的实验波形图。对比图7、图8可发现在高光反馈水平下, 仿真波形与实验波形具有很好的一致性。



(a)是目标位移 $D(t)$ 的波形图; (b) (c) (d) 分别是 $C=3, 6$ 和 $30, \alpha=5$ 时, 自混合干涉信号 $G[x_F(t); C, \alpha]$ 的仿真波形

图7 不同光反馈水平下输入信号下的干涉波形

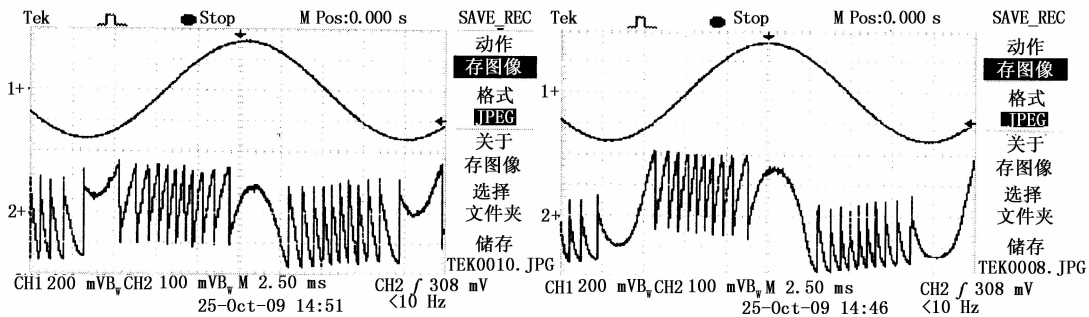


图8 高光反馈水平下自混合干涉函数的实验波形

4 结论

本文提出一种高光反馈水平下的光回馈传感器的模拟行为模型,该模型将会简化自混合现象中非线性方程的求解过程。它是由一系列基本的元器件如电阻、电容、放大器、触发器等来表示的,这种表示方法直观形象,物理意义明确。同时也提供了一种对目标位移、速度等进行测量的新的数据处理方法。该方法能够采用功能更强大、效果更好的仿真工具(如 orcad)来进行模拟仿真,不仅搭建了软硬件结合的平台,同时也是一种很好地用于高精度、实时位移测量的方法。

参考文献:

- [1] Alan B, Michael P O, Leslie C O, et al. Imaging and vibrational analysis with laser-feedback interferometry[J]. Opt lett, 1993, 18: 238 - 240.
- [2] Yu Yanguang, Yan Yanxia. An approach for measuring parameters of semiconductor lasers[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(2): 114 - 117. (in Chinese)
- [3] 禹延光, 闫艳霞. 半导体激光器线性展宽因数的估计方法[J]. 激光与红外, 2006, 36(2): 114 - 117.
- [4] Joseph El Assad, Thierry Bosch. Guy plantier laser diode under strong feedback for mechatronics applications[J]. IEEE Sensors, 2007: 387 - 390.
- [5] Usman Zabit. Thierry bosch adaptive transition detection algorithm for a self-mixing displacement sensor[J]. IEEE Sensors journal, 2009, 9(12): 1879 - 1886.
- [6] R Tkach, A Chraplyvy. Regimes of feedback effects in 1.5_μm distributed feedback lasers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1986, 4(11): 1655 - 1661.
- [7] Xi J T, Yu Y G, Chicharo Joe F, et al. Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self-mixing interferometry [J]. IEEE Quantum Electronics, 2005, 41(8): 1058 - 1064.

· 更正 ·

1. 本刊 2011 年第 4 期 P. 394 作者单位有误, 现将原文章中的作者单位修改为:

易迎彦^{1,2,3}, 刘德明^{1,2}

(1. 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 武汉理工大学理学院物理系, 湖北 武汉 430070)

YI Ying-yan^{1,2,3}, LIU De-ming^{1,2}

(1. College of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, Wuhan 430074, China; 3. Department of Physics, School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

2. 本刊 2011 年第 4 期 P. 462 第二作者郑斌应为: 郑 宾