

文章编号: 0258-7025(2010)08-1961-06

多脉冲增益调制三维实时成像系统

王飞¹ 赵远¹ 张勇¹ 靳辰飞¹ 孙秀冬¹ 苏建忠² 吕华²

(¹ 哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001; ² 天津航技术物理研究所, 天津 300192)

摘要 小型化是激光三维成像系统走向应用必须解决的重要问题之一。介绍了采用高重复频率小型激光器实现的小型化增益调制三维实时成像系统。利用多脉冲积累方式,使用单脉冲能量 5 μJ 的激光器实现了与以前单脉冲能量 10 mJ 增益调制系统近似的作用距离和系统测距精度,同时系统的整体体积大大缩小。对系统的作用距离与测距精度进行了测试,结果表明,在当前条件下,室外能见度 5 km 时,系统可达到超过 100 m 的作用距离,室内测试获得的系统测距精度优于 3 m。

关键词 成像系统;增益调制成像;多脉冲积累;激光成像

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.1961

Multi Pulse Gain-Modulated Three-Dimensional Imaging System

Wang Fei¹ Zhao Yuan¹ Zhang Yong¹ Jin Chenfei¹ Sun Xiudong¹

Su Jianzhong² Lü Hua²

(¹ Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
² Tianjin Jinhang Institute of Technology, Tianjin 300192, China)

Abstract System size is of great concern when the laser ranging system is put into practical usage. A multi-pulse gain-modulated three-dimensional imaging system is presented, which uses low pulse energy laser as illumination source. By utilizing multi pulse accumulation method, a 5- μJ pulse laser source was used to achieve a detection range of 100 m with light fog and range accuracy greater than 3 m during indoor experiment. With the using of low pulse laser source the system size is greatly reduced.

Key words imaging system; gain-modulated imaging; multi-pulse accumulation; laser imaging

1 引言

激光主动三维成像技术近年来发展迅速,特别是在高速实时成像领域出现了多种新体制,如雪崩二极管(APD)阵列成像^[1~3]、条纹管成像^[4~6]、距离选通成像^[7,8]和调频连续波成像技术^[9,10]等。此外增益调制型的激光三维测距成像系统^[11~14]也获得了极大的关注并开展了许多有益的研究工作^[15,16]。由于成像速度快,可以在获得目标强度像的同时获得目标的距离像。增益调制型激光测距成像系统的作用距离与成像精度受系统信噪比影响^[17],发射激

光强度越高,图像信噪比越高,系统的作用距离越远。文献[13,14]利用高功率的灯抽运 YAG 激光器研制了增益调制成像系统的原型机,实现了增益调制成像的外场实验结果,作用距离达到 150~180 m,所用激光器单脉冲能量约 10 mJ。目前大功率的脉冲激光器体积均较大,导致成像系统整体体积增大,而系统的小型化是增益调制脉冲三维成像系统走向应用的关键问题之一。

为进一步实现整体系统的小型化,本文利用高重复频率小型固体激光器,采用多脉冲积累方式,实

收稿日期: 2009-11-23; 收到修改稿日期: 2010-01-26

基金项目: 总装预研基金(9140A01040307HT0125)资助课题。

作者简介: 王飞(1981—),男,博士研究生,主要从事光电探测激光雷达方面的研究。E-mail: felixw@163.com

导师简介: 孙秀冬(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事非线性光学与光学信息处理、高密度光学全息存储和激光雷达等方面的研究。E-mail: xdsun@hit.edu.cn(通信联系人)

现了小型的增益调制三维实时成像系统,并对系统的性能进行实验测试。采用远低于其他系统的单脉冲能量,获得了与以前系统近似的系统作用距离及测距精度。由于激光器体积的减小,使整体成像系统体积较之前大大减小。

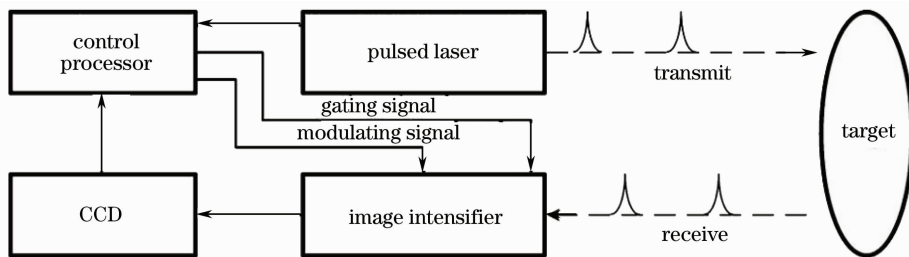


图 1 增益调制三维成像系统原理

Fig. 1 Principle of gain-modulated imaging system

脉冲激光器发射激光脉冲照明整个目标视场,经目标反射后,通过接收光学系统会聚到增强型电荷耦合器件(ICCD)上,经微通道板(MCP)放大后的信号由 CCD 接收,从而获得目标的强度信息。控制系统接收脉冲激光器发射脉冲后产生距离门信号以控制 ICCD 的开启时间,同时对 MCP 的增益进行调制。当完成一帧图像的采集后,控制系统读出 CCD 中的图像,并准备开始进行下一帧处理。

对于 CCD 图像中某特定点对应的目标反射率设为 ρ ,则该点强度 A 与目标反射率及像增强器的增益 $G(t)$ 的关系为

$$A = \int_t P \rho G(t) dt, \quad (1)$$

式中 P 为目标处对应的激光发射功率。传统情况下像增强器的增益为固定值,在增益调制成像系统中,像增强器的增益是随时间变化的。为获取目标的距离信息,首先获取一帧目标的常增益图像

$$A_c = \int_t P \rho G_c dt, \quad (2)$$

再获取一帧增益随时间变化的变增益图像

$$A_v = \int_t P \rho G_v(t) dt. \quad (3)$$

假设该特定点所对应的目标距离变化较小,则在目标范围内像增强器的增益变化较小,可视为固定值 $G_v(t_d)$,其中 t_d 为目标激光脉冲从发射到接收到目标回波的时间,与目标距离 R 的对应关系为

$$R = \frac{c}{2} t_d, \quad (4)$$

式中 c 为光速。则变增益图像与常增益图像强度值相除可得

2 增益调制三维成像原理

一般增益调制三维成像系统原理^[13]如图 1 所示。

$$\begin{aligned} \frac{A_v}{A_c} &= \frac{\int_t P \rho G_v(t) dt}{\int_t P \rho G_c dt} = \\ &= \frac{G_v(t_d) \int_t P \rho dt}{G_c \int_t P \rho dt} = \frac{G_v(t_d)}{G_c}. \end{aligned} \quad (5)$$

对于本文中的实验系统,对应的增益随时间近似成指数变化,可表示为

$$G_v(t) = a \exp[b(t - t_s)], \quad (6)$$

式中 t_s 为距离门开启前的延迟时间, a, b 均为固定的系数,可通过测量 MCP 增益特性曲线获得。结合(5)式可得

$$G_v(t_d) = a \exp[b(t - t_s)] = G_c \frac{A_v}{A_c}, \quad (7)$$

即

$$t_d = \frac{1}{b} \ln\left(\frac{1}{a} G_c \frac{A_v}{A_c}\right) + t_s, \quad (8)$$

由此可得目标处的距离为

$$d = \frac{c}{2} t_d = \frac{c}{2b} \ln\left(\frac{1}{a} G_c \frac{A_v}{A_c}\right) + \frac{c t_s}{2}. \quad (9)$$

由(9)式进一步分析可知此系统的测距距离及测距精度主要由系统的信噪比决定^[15]。多个脉冲积累时,则有

$$A = \sum_i a_i, \quad (10)$$

式中 a_i 为第 i 个脉冲在探测器上产生的强度。对于每个脉冲对应的变增益和常增益有

$$\frac{a_{v1}}{a_{c1}} = \frac{a_{v2}}{a_{c2}} = \dots = \frac{a_{vi}}{a_{ci}}, \quad (11)$$

则对于多次脉冲积累的结果有

$$\frac{A_v}{A_c} = \frac{\sum_i a_{vi}}{\sum_i a_{ci}} = \frac{a_{vi}}{a_{ci}}, \quad (12)$$

即多次积累后的变增益与常增益强度的比值与积累次数无关。图像的多次积累能够大大提高系统的信噪比,因此采用多脉冲积累的方式能够显著提高系统的测距距离和测距精度。在同样的系统作用距离和测距精度条件下,利用多脉冲积累方式,可以显著降低单脉冲的激光发射能量,因此采用高重复频率

小型固体激光器替代大功率大型激光器,可以在不降低系统作用距离及测距精度的条件下,大大降低整体系统体积及重量,有利于系统的小型化。

3 小型三维实时成像实验系统

基于第 2 节的原理,设计了一套小型三维实时成像实验系统,系统结构如图 2 所示,由硬件系统和软件系统两部分组成。

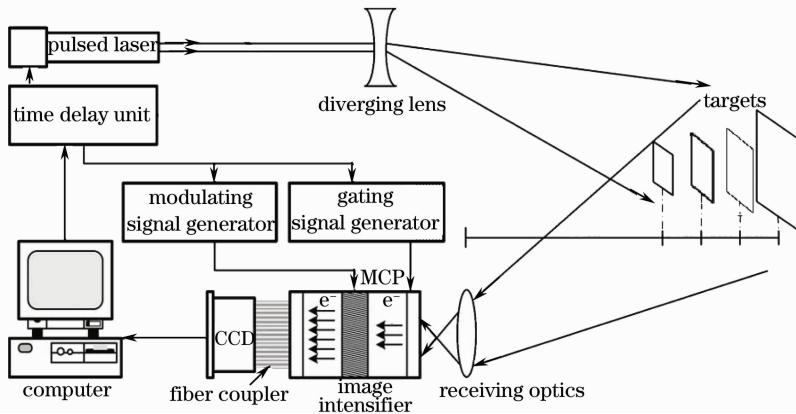


图 2 小型三维成像实验系统硬件结构

Fig. 2 Structure of imaging system

3.1 系统硬件组成

系统硬件部分主要包括激光器,接收光学系统,像增强器,CCD 探测器,同步控制电路及 MCP 增益控制电路。系统采用高重复频率激光二极管抽运固体激光器,输出激光波长为 532 nm。激光重复频率 2.5 kHz。单脉冲能量 5 μJ。采用的 CCD 相机成像速度为 50 frame/s,每两帧图像可以获得一帧距离像,最终获得的系统成像速率为 25 frame/s。由于激光器重复频率远高于 ICCD 成像频率,因此每一帧

CCD 图像中都包含了多次的激光脉冲积累的结果。

系统主要部分时序如图 3 所示。由激光器发射出一系列激光脉冲,每发出一个激光脉冲,控制电路即同步控制 ICCD 前的光电阴极选通门开启,同时控制 MCP 的增益。MCP 的增益通过控制加在 MCP 两极间的电压实现。常增益时,MCP 电压固定为常数值,变增益时电压由初始值到最大值之间线性变化,对应的 MCP 增益成指数变化。CCD 的曝光时间同样由控制电路控制,并在 CCD 两次曝光

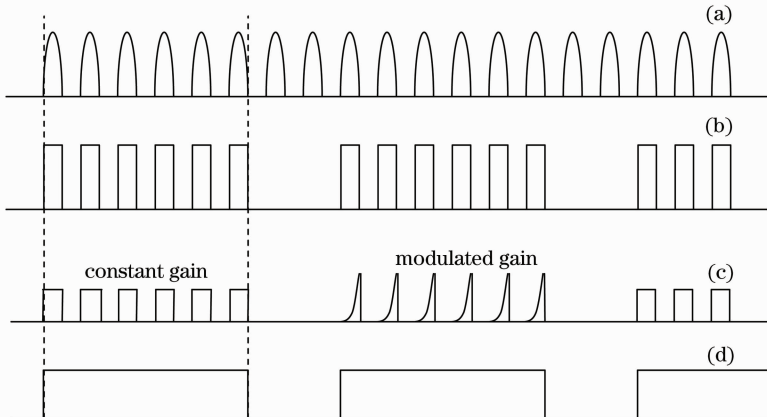


图 3 系统时序。(a)激光脉冲;(b)MCP 选通门;(c)MCP 增益;(d)CCD 曝光

Fig. 3 System timing. (a) laser pulse; (b) MCP gate; (c) MCP gain; (d) CCD exposure

之间空出部分时间供 CCD 读出数据,以免对下一帧 CCD 成像结果造成影响。由于激光器发射脉冲的频率远高于 CCD 相机的成像频率,所以每一帧所获得的 CCD 图像均进行了多次脉冲的累计。由此可以提高系统的信噪比,同时降低发射脉冲能量起伏对系统测距精度造成的影响。

系统发射及接收系统实物如图 4 所示。不包括计算机系统在内,系统的激光器,发射光学系统,接收光学系统,像增强器,CCD 相机,MCP 调制电源均放置在箱体中,箱体大小为 30 cm 左右。右下角处为激光发射系统,脉冲激光经光学系统扩束后照明目标光场。下中部为单点测距系统,用于对目标进行单点测距,提供距离参考信息,以便与成像系统获得的距离值进行对比。左下角为接收光学系统,加入窄带滤波片以滤除背景杂波。上方为实验过程中用于实时监测系统工作状态的探头。

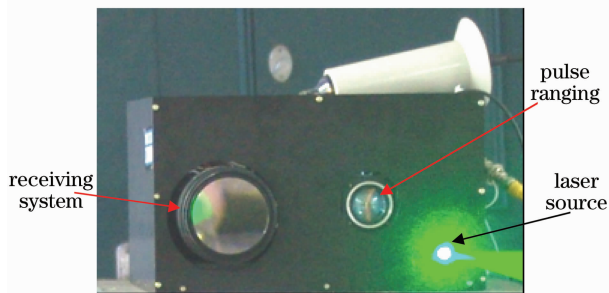


图 4 成像系统实物图
Fig. 4 Imaging system photo

3.2 软件系统

系统软件部分采用自行编写的程序,完成 CCD 相机的参数设置、控制以及图像的采集,系统状态的监测及距离像的实时处理。软件用 Visual C++ 语言编写,通过计算机串口获得系统当前状态信息,并通过图像采集卡获取 CCD 图像信息,具体流程如图 5 所示。程序开始运行后,首先对系统的运行环境进行设置,包括 CCD 工作状态、曝光时间、串口通讯速率等。然后监测串口,当接收到硬件系统发过来的指令后确定当前帧是否为常增益,如果为常增益则进行图像采集并将采集到的图像储存在常增益缓存中,否则将采集到的图像存储到变增益缓存中。当采集到一帧常数增益和变增益图像后,根据系统当前给的距离门延迟、增益调制速度等参数信息,利用所获得的两幅图像,实时处理出目标的距离像。可实时地显示当前所获得的目标强度像以及距离像。

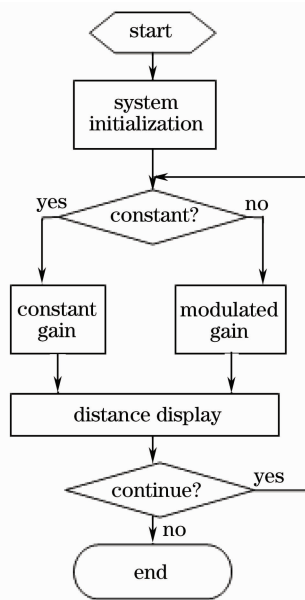


图 5 系统软件工作流程图
Fig. 5 Software procedure

4 实验结果

4.1 室内测距精度实验

利用第 3 节所述的系统,首先在室内对 5 个平板目标进行了测距精度实验。目标实物图如图 6(a)所示。所采用的平板为纸制包装箱,在图中分别用 A, B, C, D, E 标识。目标距离探测系统的范围为 20~36 m。目标板均匀排列,垂直于激光传播方向,相互间隔 4 m。为比较目标反射率对成像精度的影响, D 包装箱外部粘上一张高反射率白纸作对比。

图 6(b)为实验所获得的常增益条件下的目标强度像,图 6(c)为增益调制条件下的目标强度像。

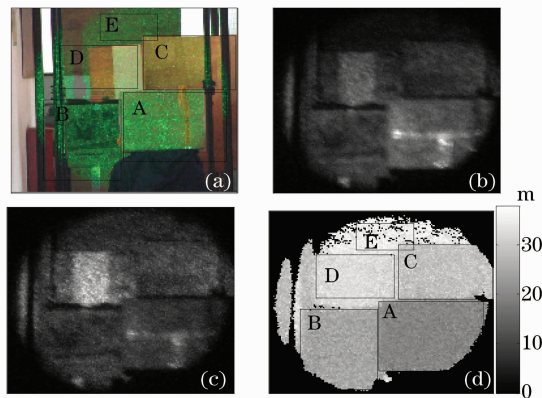


图 6 室内实验结果。(a)目标实物;(b)常增益像;(c)调制增益像;(d)距离像

Fig. 6 Indoor test results. (a) object photo; (b) constant gain image; (c) modulated gain images; (d) distance image

在目标强度像上,不同反射率的物体区别较为明显,但未包含距离信息。图 6(d)为实时获取的距离像。由距离像中可明显将几个不同距离处的目标区别开来,如图中所标的 A,B,C,D,E 几个平板区域,不同目标间的距离差别非常明显。分别对 A,B,C,D,E 5 个区域内取 100 个测量样本,计算了其平均值和误差,与真实距离对比结果如表 1 所示。

表 1 测量值与真实距离对比

Table 1 Comparison of measured and actual distance

Distance /m	Measured mean distance /m	Root mean square /m
A	19.5	0.56
B	23.8	0.64
C	29.1	0.55
D	32.7	0.50
E	34.5	1.15

由表 1 中结果可见,在室内测量条件下,系统测量平均值与真实值差别小于 1.5 m,考虑到测量值的起伏后,测量值与真实值误差小于 3 m,即此时系统的测距精度小于 3 m。

从标示为 D 的区域中可见,由于白纸的反射率远高于纸板的反射率,其回波强度比纸板强很多,在目标强度像中,其与纸板有较大的区别,而从距离像中,看不出其差别。由此可以证明,系统的距离像与目标自身的反射率关系不大。

4.2 系统作用距离实验

为测试系统的远距离成像能力,利用此系统在晚间进行了外场实验,实验当天有轻雾,能见度 5 km 左右。实验条件除距离门延迟提高外,其他条件与室内实验相同,实验结果如图 7 所示。目标为

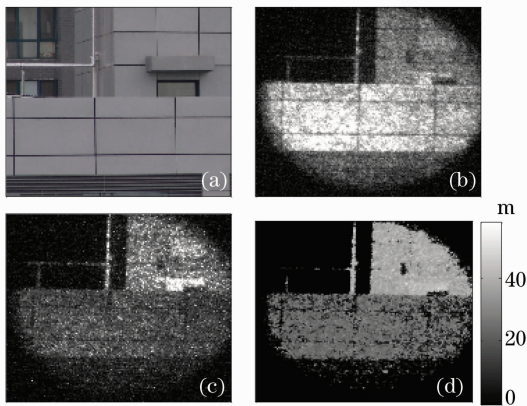


图 7 室外实验结果。(a)目标实物;(b)常增益像;(c)调制增益像;(d)距离像

Fig. 7 Outdoor test results. (a) object photo; (b) constant gain image; (c) modulated gain image; (d) distance image

距离 100 m 左右的大楼及楼顶的小房子。图 7(a)为目标实物图,图 7(b)为目标的常增益像,图 7(c)为增益调制条件下的目标强度像,图 7(d)为目标处的相对距离像,图中距离加上选通门延迟即为目标的实际距离。由距离像中明显可见,不同距离的墙体间有明显的距离差别。可见在 100 m 左右的距离上,系统仍能正常工作。

5 结 论

利用高重复频率小功率脉冲固体激光器实现了增益调制三维实时成像技术。实验结果表明当前情况下,可以利用高重复频率小功率激光器,通过多脉冲积累方式替代大功率激光器实现系统的远距离测距。本文所采用的激光器单脉冲能量 $5 \mu\text{J}$,通过多脉冲积累的方式,获得了与单脉冲 10 mJ 激光器系统近似的作用距离和系统测距精度。室外实验时,在有轻雾的天气条件下系统作用距离超过 100 m,室内实验获得的系统的距离精度可达到 3 m 以下。目前存在的主要问题在于系统中还需要计算机进行数据的采集与处理,为使系统进一步小型化并走向实用,目前正研究利用数字信号处理器(DSP)取代计算机进行数据的采集与处理,能够进一步提高系统的运算速度,并减小系统体积。此外采用更好的图像处理算法可以获得更好的距离像。

参 考 文 献

- 1 R. M. Marino, W. R. Davis, Jr. Jigsaw. A foliage-penetrating 3D imaging laser radar system[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2005, **15**(1): 23~36
- 2 M. A. Albota, R. M. Heinrichs, D. G. Kocher *et al.*. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(36): 7671~7678
- 3 D. Stoppa, L. Pancheri, M. Scanduzzo *et al.*. A CMOS 3-D imager based on single photon avalanche diode[J]. *IEEE Trans. Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2007, **54**(1): 4~12
- 4 A. D. Gleckler. Multiple slit streak tube imaging lidar (MS-STIL) applications[C]. *SPIE*, 2000, **4039**: 266~278
- 5 Zhao Baosheng, Chen Min. The application of MS-streak tube in three-dimensional lidar system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1425~1427
- 6 赵宝升, 陈敏. 采用多狭缝条纹管实现激光三维成像[J]. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1425~1427
- 7 Wei Jingsong, Cheng Yuanli, Xu Qiang *et al.*. Imaging by single-slit streak tube laser lidar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 496~500
- 8 魏靖松, 程元丽, 徐强等. 单狭缝条纹管激光雷达的成像[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 496~500
- 9 J. Busck, H. Heiselberg. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(24): 4705~4710
- 10 J. Beck, M. Woodall, R. Scritchfield *et al.*. Gated IR imaging

- with 128×128 HgCdTe electron avalanche photodiode FPA[J]. *J. Electronic Materials*, 2008, **37**(9): 1334~1343
- 9 B. C. Redman, B. Stann, W. Ruff *et al.*. Anti-ship missile tracking with a chirped amplitude modulation lidar[C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 113~124
- 10 B. Stann, B. C. Redman, W. Lawler *et al.*. Chirped amplitude modulation lidar for range and Doppler measurements and 3-D imaging[C]. *SPIE*, 2007, **6550**: 65505
- 11 X. Zhang, H. Yan, M. Zheng. A new three dimension PLMR imaging system[C]. *SPIE*, 2006, **6024**: 60241A
- 12 X. Zhang, H. Yan, Y. Jiang *et al.*. A 3D framing camera with pulse laser and modulated receiver [C]. *SPIE*, 2007, **6279**: 62792K
- 13 C. Jin, Y. Zhao, Y. Zhang *et al.*. Scannerless three-dimensional imaging using a pulsed laser and an intensified charge-coupled device with linearly modulated gain [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3823~3829
- 14 Y. Zhang, Y. Zhao, L. Liu *et al.*. A promoted lidar imaging system based on gain modulation [C]. *SPIE*, 2009, **7382**: 73822V
- 15 Jin Chenfei, Zhao Yuan, Zhang Yong *et al.*. Experimental research on a scannerless 3D imaging laser radar[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1383~1387
靳辰飞, 赵 远, 张 勇 等. 一种无扫描三维成像激光雷达的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1383~1387
- 16 Zhang Yong, Zhao Yuan, Liu Liping *et al.*. Range resolution improvement of scannerless laser radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1270~1274
张 勇, 赵 远, 刘丽萍 等. 一种提高非扫描激光雷达距离分辨率的方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1270~1274
- 17 C. Jin, X. Sun, Y. Zhao *et al.*. Gain-modulated three-dimensional active imaging with depth-independent depth accuracy [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(22): 3550~3552