

doi: 10.3788/gzxb20144302.0206006

# 重构-等效啁啾分布反馈半导体激光器的多信号直调特性

陈刚, 张方正, 潘时龙

(南京航空航天大学 电子信息工程学院 微波光子实验室, 南京 210016)

**摘 要:**在测量与分析频率响应与动态范围的基础上,研究了重构-等效啁啾分布反馈半导体直调激光器偏置电流以及调制信号的微波功率对直调结果的影响.将 300 Mb/s 基带信号与 1.562 5 Gb/s 超宽带信号同时直接加载到该激光器上,经过 10 km 单模光纤传输后进行波形、频谱及误码率的检测,结果表明:基带信号与超宽带信号的功率代价分别为 1.98 dB 与 0.92 dB;该激光器具有良好的多信号直接调制性能,在基于波分复用无源光网络的多业务融合网络中具有重要的应用前景.

**关键词:**光纤通信;光载无线;调制;分布反馈激光器;重构-等效啁啾;超宽带;波分复用

中图分类号:TN25; TN923

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)02-0206006-6

## On the Multi-signal Direct Modulation Characteristics of a Reconstruction-equivalent-chirp Distributed Feedback Laser Diode

CHEN Gang, ZHANG Fang-Zheng, PAN Shi-Long

(*Microwave Photonics Research Laboratory, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

**Abstract:** The direct modulation performance of a reconstruction-equivalent-chirp distributed feedback laser diode was experimentally investigated. The frequency response and the dynamic range were measured and analyzed. The influence on the direct modulation performance caused by the bias current of the laser diode and the RF power of the modulated signal was also investigated. Error-free transmission of a 300 Mb/s baseband signal together with a 1.562 5 Gb/s ultra-wideband signal in a 10 km single mode fiber using the distributed feedback laser diode was achieved. The power penalties of the baseband signal and the ultra-wideband signal were 1.98 dB and 0.92 dB, respectively. The distributed feedback laser diode can find applications in the wavelength-division-multiplexed passive optical network based hybrid networks.

**Key words:** Optical fiber communication; Radio over fiber; Modulation; Distributed feedback lasers; Reconstruction-equivalent-chirp; Ultra-wideband (UWB); Wavelength division multiplexing

**OCIS Codes:** 060.0060; 060.2330; 140.0140; 140.3490

## 0 引言

近年来,波分复用无源光网络(Wavelength-Division-Multiplexed Passive Optical Network, WDM-PON)以其低功耗、无传输速率限制、无传输协议限制、易于升级、网络管理简单等优点受到广泛关注,被

认为是下一代主流的有线接入方式<sup>[1-2]</sup>.无线接入方面,光载超宽带(Ultra-Wideband over Fiber, UWBoF)系统具有低成本、低功耗以及高速率等优点,是实现未来无线局域网或个域网的理想解决方案<sup>[3-4]</sup>.在现有 WDM-PON 架构中同时提供有线接入与超宽带无线接入能够避免专用光纤网络的铺设,降低系统能耗和成

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 61107063)、博士点基金(No. 20113218120018)、霍英东基金(No. 131063)和教育部留学回国人员科研启动基金资助

**第一作者:**陈刚(1988-),男,硕士研究生,主要研究方向为光载超宽带信号的产生和传输. Email: easongang@126.com

**导师(通讯作者):**潘时龙(1982-),男,教授,博士,主要研究方向为微波光子学. Email: pans@nuaa.edu.cn

**收稿日期:**2013-07-23; **录用日期:**2013-09-23

<http://www.photon.ac.cn>

本<sup>[5-6]</sup>. 如果在 WDM-PON 的中心站采用价格低廉但能同时实现多信号直接调制的激光器作为光源, 将省去昂贵的外调制器件从而进一步降低系统成本<sup>[7]</sup>. 由于以上原因, 研究和提高直调激光器的调制性能一直是国内外的研究热点<sup>[8-12]</sup>. 文献[13-14]提出了重构-等效啁啾技术, 制作出了具有完全自主知识产权的分布反馈半导体激光器 (Distributed Feedback Laser Diode, DFB-LD), 该激光器制作工艺简单, 但单模成品率高. 传统的商用直调 DFB-LD 都是基于多量子阱结构来提高其单模特性, 但在比较高的电流注入条件下, 会产生严重的烧孔效应而造成多模工作, 因此工作电流只能在阈值附近. 而采用重构-等效啁啾的 DFB 激光器则可以提高其单模特性的稳定性, 不会由于工作电流过大或者环境温度过高而造成多模工作. 同时, 重构-等效啁啾技术与当前的微电子工艺是相兼容的, 更易于实现激光器阵列的集成, 从而更加节约成本<sup>[15]</sup>.

本文对 DFB-LD 的直调性能进行实验研究, 首先测量与分析该激光器的频率响应和动态范围, 然后将不同频带的有线基带信号和无线超宽带信号同时直接调制于此激光器, 实现了 10 km 普通单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 的无误码传输. 研究结果证明了该激光器具有良好的多信号直接调制性能, 在 WDM-PON 与光载无线混合网络中具有重要的应用价值.

## 1 实验装置

图 1 为基于该 DFB-LD 的多信号直调系统实验框图. 图中 PRBS 为 300 Mb/s 的有线基带信号, UWB 为 1.5625 Gb/s 的超宽带无线信号. 其中 UWB 信号是由码型产生器的正负输出端差分延时而产生的高斯一阶微分 (monocycle) 脉冲信号. 此两路信号经电耦合器合波后用于驱动 DFB-LD, 实现直接调制. 调制后的光信号经过光衰减器 (Attenuator, ATT) 控制光功率后, 送入单模光纤完成传输并通过光电探测器实现光电转换, 得到的电信号被功分器分为两路. 其中一路使用

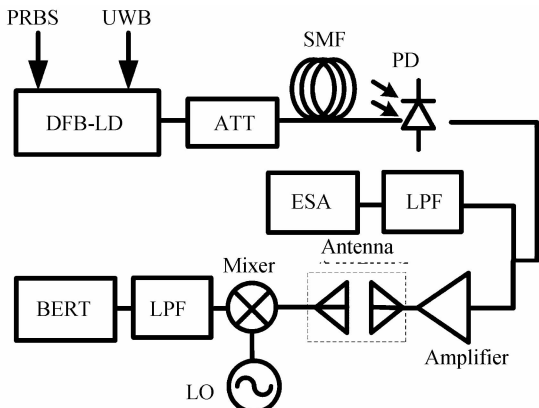


图 1 多信号直调传输实验装置

Fig. 1 Experimental setup for the transmission of multi-signal using the directly modulated DFB LD

550 MHz 低通滤波器滤出有线基带信号, 使用频谱仪与示波器分别对信号的频谱与波形进行监测, 并通过误码仪进行误码率测量. 另一路电信号经过超宽带天线进行超宽带信号的无线收发, 得到的超宽带信号由 3.125 GHz 的本振信号下变频到基带后经过 2 GHz 的低通滤波器检测误码率.

## 2 半导体激光器直调特性

### 2.1 直调激光器的频率响应

图 2 为测量得到的重构-等效啁啾 DFB-LD 的频率响应曲线. 该激光器在 10 dB 衰减处的调制带宽为 7.3 GHz, 其低频 (DC-4.5 GHz) 响应较平坦, 高频响应在 4.8 GHz, 7.5 GHz 和 9.2 GHz 处有较深的凹陷. 这些凹陷是由不理想的射频封装造成的, 对基带信号的直接调制不会引起明显的失真. 由于超宽带信号频谱较宽, 其直接调制会受到一定影响, 但考虑到超宽带信号抗频谱衰落特性, 超宽带传输性能不会有太大恶化. 图 3 为测量得到的超宽带信号直接调制前后的频谱图, 可以发现, 调制后的信号在 4.8 GHz, 7.5 GHz 处有一定的陷波, 并且在 8.4 GHz 之后迅速衰减, 这些都与激光器的频率响应相符合. 尽管如此, 调制后的超宽带信号仍保有 6.3 GHz 带宽, 说明该激

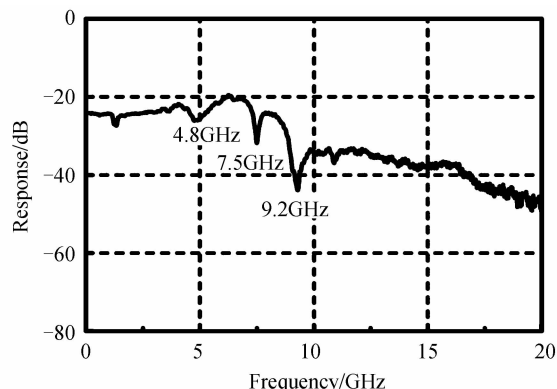
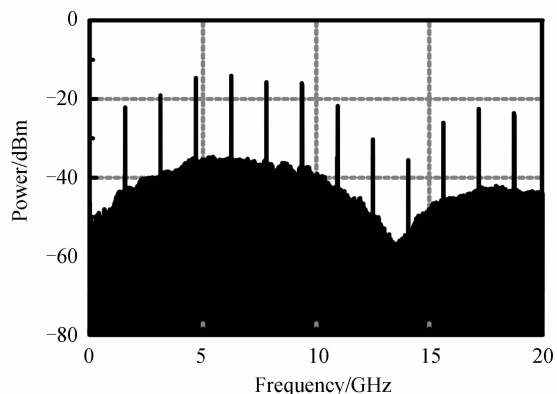
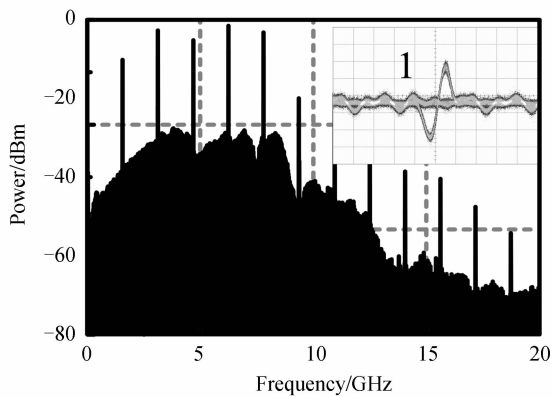


图 2 直调激光器的频率响应

Fig. 2 Frequency response of the reconstruction-equivalent-chirp DFB-LD



(a) The original UWB signal



(b) The UWB signal after modulation

图3 超宽带信号调制前后对比

Fig. 3 The comparison of the UWB signals before and after modulation

激光器可以实现对超宽带信号的直接调制.

### 2.2 直调激光器的动态范围

图4为测试得出的3.125 GHz频率处该DFB-LD的动态范围.图4中,输入双音信号频率间隔为10 MHz,激光器的动态范围为78 dB,当输入信号的功率大于11.7 dBm时开始出现三阶交调信号,并且当输入信号功率为18.8 dBm时达到三阶交调点.因此为了避免基带信号和超宽带信号共同调制时的交调失真,应控制两种信号的输入功率,以达到最优化的系统性能.

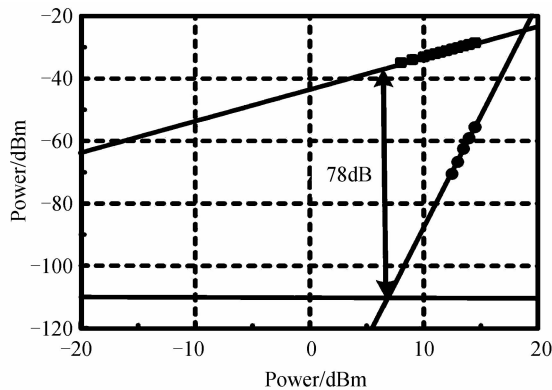


图4 频率间隔为10 MHz时的动态范围

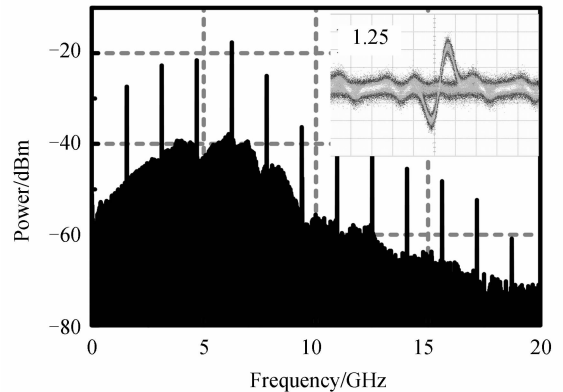
Fig. 4 The dynamic range when the frequency span is 10 MHz

### 2.3 激光器偏置电流对直调特性的影响

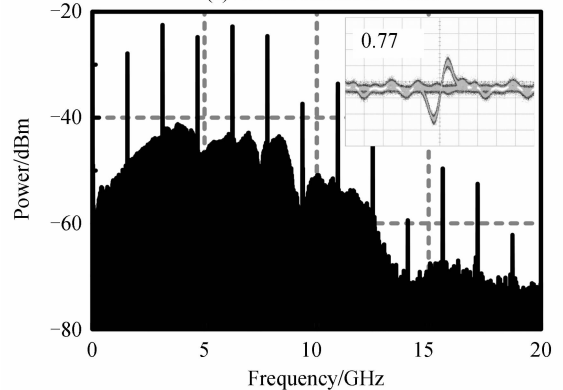
激光器的偏置电流决定了激光器的工作点,是影响激光器直调性能的重要参量之一.本文以超宽带信号的直接调制为例,分析了不同偏置电流对激光器直调特性的影响.

图5(a)、(b)为激光器的驱动电流分别为44 mA、76 mA时直调后得到的UWB信号眼图与频谱.无失真条件下时域monocycle脉冲中正负部分的幅度比应为1.当激光器的偏置电流为44 mA时,由于工作点偏低,UWB调制信号功率较大时,负脉冲形状会产生失

真,得到的正负脉冲比为1.25;当偏置电流为76 mA时,由于激光器的工作点偏高,正脉冲会产生失真,得到的正负脉冲比为0.77.对激光器偏置电流进行优化后,将其设置为60 mA,此时直接调制产生的UWB信号正负脉冲比为1,如图3(b)所示.



(a) Driven current is 44mA



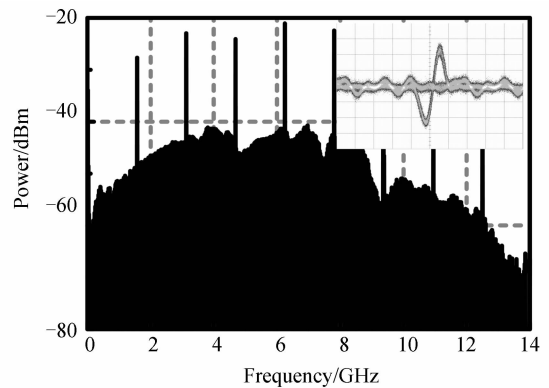
(b) Driven current is 76mA

图5 不同驱动电流对调制结果的影响

Fig. 5 Eye diagrams and electrical spectra of the UWB signals for different driven currents to the LD

### 2.4 调制信号功率对直调性能的影响

调制信号的功率对激光器直调特性的影响同样重要,过大的调制信号功率会导致如图5所示的调制失真,而过小的调制信号功率会导致信号的信噪比降低,影响传输性能.图6(a)、(b)分别为UWB调制信号功率为7 dBm、4 dBm时的直调结果.当调制信号功率为7 dBm时,调制后的UWB信号眼图清晰,无失真产生.



(a) 7 dBm

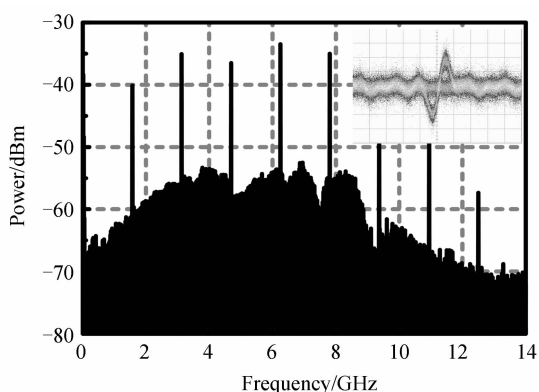
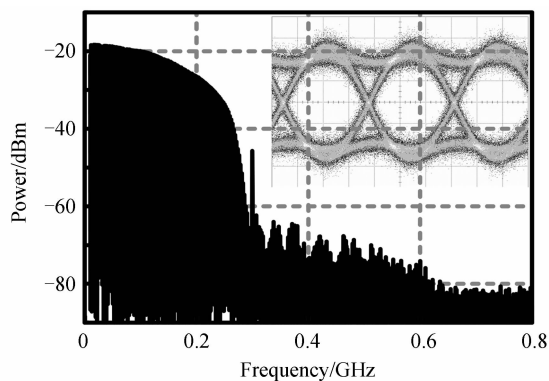


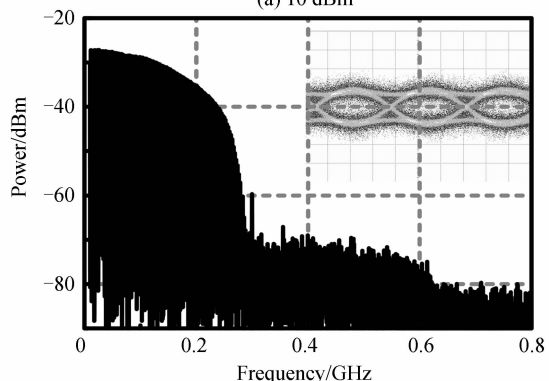
图6 不同超宽带调制功率对调制结果的影响

Fig. 6 Eye diagrams and electrical spectra of the UWB signals for different RF powers

当调制信号功率较小(4 dBm)时,调制后的信号幅度变小,眼图变模糊,其频谱中的连续谱功率只有-55 dBm左右,这将很大程度上影响 UWB 信号的传输性能.图7(a)、(b)分别为基带调制信号功率为 10 dBm 和 6 dBm时的调制结果.与 UWB 信号调制类似,在保证信号不失真时,调制功率越大,调制后的信号幅度也越大,眼图越清晰.



(a) 10 dBm



(b) 6 dBm

图7 不同基带调制功率对调制结果的影响

Fig. 7 Eye diagrams and electrical spectra of the baseband signals for different electrical powers

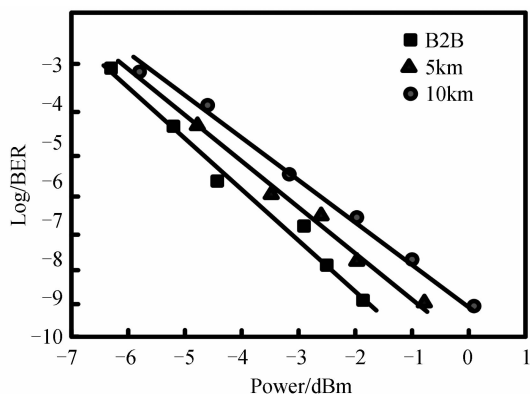
### 3 多信号直调传输性能分析

针对 WDM-PON 有线与无线信号同时传输的需

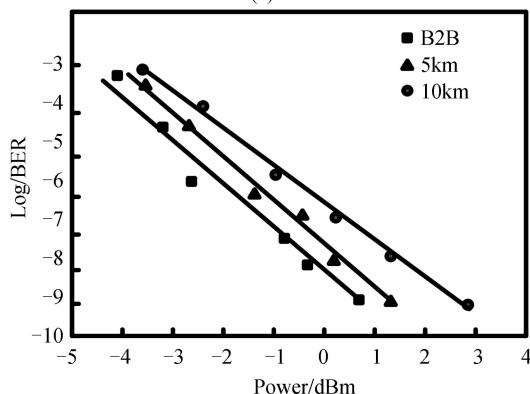
求,本文对该激光器的多信号直调传输性能进行了实验研究,系统结构如图1.

#### 3.1 有线基带信号的传输特性

研究有线基带信号的传输特性时,超宽带信号的调制功率稳定在 7 dBm.图8(a)为基带调制信号功率为 10 dBm 时,经背靠背、5 km SMF、10 km SMF 传输后测量得到的误码率曲线.图中结果显示,背靠背情况下,在  $BER=1 \times 10^{-9}$  条件下,接收基带信号的灵敏度为-1.86 dBm,经过 10 km 传输后接收基带信号的灵敏度为 0.12 dBm,相应的功率代价为 1.98 dB;图8(b)为基带调制信号功率为 6 dBm 时的误码率测试结果,在背靠背传输的情况下,接收基带信号的灵敏度为 0.69 dBm,经过 10 km 传输后接收基带信号的灵敏度为 2.85 dBm,相应的功率代价为 2.16 dB.以上结果说明,当调制信号功率为 10 dBm 时,基带信号能取得不错的传输性能,而调制功率较小时,由于调制后信号的信噪比下降,传输性能恶化.



(a) 10 dBm



(b) 6 dBm

图8 不同调制功率的基带信号误码率

Fig. 8 The BER curves for baseband signals with different RF powers

#### 3.2 超宽带信号的传输特性

研究超宽带信号的传输特性时,基带有线信号的调制功率稳定在 10 dBm.图9(a)、(b)分别为经过 10 km 光纤传输前后超宽带信号的频谱和眼图.由于理想的超宽带天线具有 3.1~10.6 GHz 频段的带通滤波功能,因此 300 Mb/s 的有线基带信号经过无线传输后

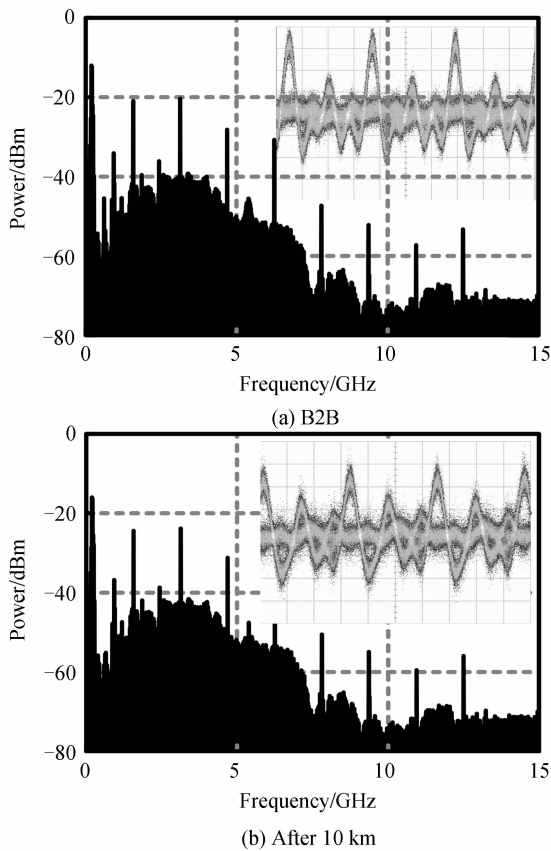


图9 10 km 光纤传输前后超宽带信号的频谱和眼图  
 Fig.9 Eye diagrams and electrical spectra of the UWB signals before and after 10 km SMF transmission  
 会被滤除,对超宽带信号的接收没有影响.通过对图9(a)、(b)进行对比可知,经过10 km SMF 传输后超宽带信号功率有很小的衰减,眼图有一定程度的恶化.图10为调制信号功率不同时超宽带信号传输的误码率,由图10(a)可知,当信号的调制功率为7 dBm时,背靠背传输时接收机灵敏度为1.47 dBm,经过10 km 传输后接收机灵敏度为2.39 dBm,相应的功率代价0.92 dB;图10(b)则为调制信号为4 dBm时的超宽带为信号传输误码率:背靠背情况下接收机灵敏度为3.31 dBm,10 km 传输后接收机灵敏度为4.61 dBm,相应的功率代价为1.3 dB.以上结果说明超宽带信号

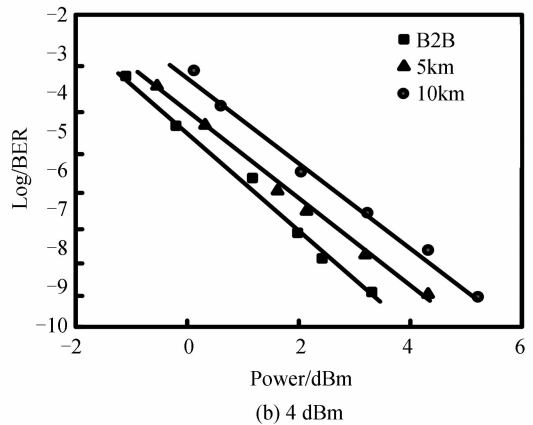


图10 不同调制功率的基带信号误码率  
 Fig.10 The BER curves for UWB signals with different RF powers

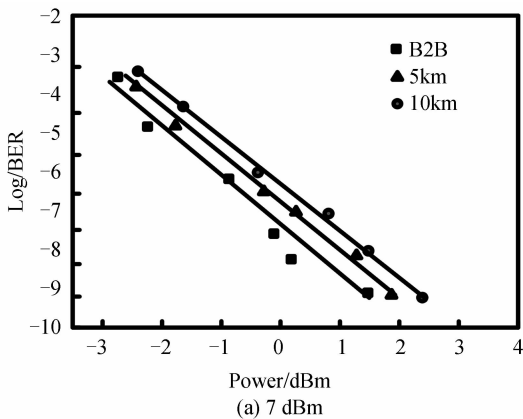
经过此激光器的直接调制并传输后能够取得很好的系统性能.

#### 4 结论

本文对国内自主研发的重构-等效啁啾分布反馈半导体激光器的直调性能进行了研究,分析了它的直调响应曲线和动态范围,并且实验实现了多信号调制下10 km SMF 的无码传输:300 Mb/s 有线基带信号与1.5625 Gb/s 无线超宽带信号的最小功率代价分别为1.98 dB与0.92 dB.以上研究结果证明此激光器可以实现有线基带信号与宽带无线信号的直接调制,在WDM-PON 与光载无线混合网络中具有重要的应用价值.

#### 参考文献

- [1] BANERJEE, PARK Y, CLARKE F, *et al.* Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review[J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, 4(11): 737-758.
- [2] GROBE G, ELBERS J P. PON in adolescence: From TDMA to WDM-PON[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(1): 26-34.
- [3] RAN M, LEMBRIKOV B I, BEN EZRA Y. Ultra-Wideband Radio-Over-Optical fiber concepts, technologies and applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(1): 36-48.
- [4] YAO Xian-xun, YAN Juan-juan. Transmission performance of ultra wideband pulse radar signal over fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(5): 522-527.  
 姚现勋, 闫娟娟. 光载超宽带脉冲雷达信号传输性能研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(5): 522-527.
- [5] CHANG G K, CHOWDHURY A, JIA Z S, *et al.* Key technologies of WDM-PON for future converged optical broadband access networks [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, 1(4): C35-C50.
- [6] PONZINI F, CAVALIERE F, BERRETTINI G, *et al.* Evolution scenario toward WDM-PON[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, 1(4): C25-C34.
- [7] SUEMATSU Y, IGA K. Semiconductor lasers in photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9): 1132-1144.



- [8] AIDA K, SUGIE T. Multipath interference test method using synthesized chirped signal from directly modulated DFB-LD with digital-signal-processing technique [C]. ECOC, 2011, Tu. 5. LeCervin. 6.
- [9] CHO J H, SUNG H K. Simple optoelectronic oscillators using direct modulation of dual-section distributed-feedback lasers [J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(23): 2172-2174.
- [10] XU Qing-yang, LI Xun, XU Chang-qing, *et al.* Modulation crosstalk and reduction in distributed feedback laser diode and monitor photodiode monolithically integrated optical transceivers[J]. *Quantum Electronics*, 2010, **46**(3): 323-331.
- [11] SHU Ya, OU-YANG Xian, LIU Bai-yu, *et al.* Pulse driver circuit for directly modulated semiconductor laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 519-522.  
舒雅, 欧阳娴, 刘百玉, 等. 直接调制半导体激光器的脉冲驱动电路研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(3): 519-522.
- [12] LI Chung-yi, CHANG Ching-hung, WU Po-yi, *et al.* Fiber optical CATV transport systems based on PM and light injection-locked DFB LD as a duplex transceiver[C]. OFC/NFOEC, 2012, Jth2A: 1-3.
- [13] SHI Yue-chun, CHEN Xiang-fei, ZHOU Ya-ting, *et al.* Experimental demonstration of the three phase shifted DFB semiconductor laser based on reconstruction-equivalent-chirp technique[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(16): 17374-17379.
- [14] DAI Yi-tang, CHEN Xiang-fei. DFB semiconductor lasers based on reconstruction-equivalent-chirp technology [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(5): 2348-2353.
- [15] HILLMER H, KLEPSER B. Low-cost edge-emitting DFB laser arrays for DWDM communication systems implemented by bent and tilted waveguides[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, **40**(10): 1377-1383.