

# 基于 LiNbO<sub>3</sub> 调制器的 40GHz 宽带调制光源的设计\*

祝宁华<sup>†</sup> 黄亨沛 谢亮 刘宇 曾雄文

(中国科学院半导体研究所 集成光电国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 介绍了基于 LiNbO<sub>3</sub> 电光强度调制器的 40GHz 宽带调制光源的设计. 对其中的关键技术, 如直流激光器稳态工作、调制器输出功率稳定性、频率响应预失真补偿以及整体设计等逐一加以分析, 并提出解决方案. 成功实现了基于 LiNbO<sub>3</sub> 电光强度调制器的宽带调制光源, 并对该高速光源进行了一系列性能和指标测试. 光源的频率响应 3dB 带宽达到 40GHz, 可用于 40GHz 频率范围内光电子器件频率响应特性测试, 同时也满足 SDH/SONET 传输实验要求.

**关键词:** 光通信; 宽带光源; LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器; 频率响应

EEACC: 4250

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)12-2178-06

## 1 引言

近年来, 光纤通信系统不断向着更大容量、更高速率的方向发展. 目前, 光通信单路带宽已达到 10Gbit/s, 以此为基础的  $N \times 10G$  波分复用 (WDM) 系统已被广泛商用<sup>[1]</sup>. 同时, 单路带宽 40Gbit/s 系统已成为下一个发展目标. 光纤通信系统的构成离不开宽带光源的支持, 因此对于 40Gbit/s 宽带调制光源的研究正成为当前的热点.

光纤通信常用的宽带光源有直接调制激光器、电吸收调制器和 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器<sup>[2]</sup>. 直接调制激光器虽然具有方便、经济等优点, 但其 3dB 带宽很难超过 30GHz<sup>[3]</sup>. 而且直接调制具有很大的局限性, 难以达到大的消光比和长的传输距离<sup>[3]</sup>. 电吸收调制器响应速度快、体积小、驱动电压低, 且便于集成. 但目前 40Gbit/s 高速电吸收调制器集成光源尚未产品化, 仅有 OKI 和 CIP 等公司发布了 40Gbit/s 电吸收调制器的相关产品信息. 相比之下, LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器具有其独特的优势, 不仅可以实现零啁啾或负啁啾, 更能获得大的消光比和极高的带宽 (> 100GHz)<sup>[4,5]</sup>. 因此, 采用稳态 DFB 激光器 + LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器来实现宽带光源是当前很好的选择.

本文重点讨论了基于 LiNbO<sub>3</sub> 电光强度调制器的宽带调制光源的设计. 对其中的关键技术, 如直流激光器稳态工作、调制器输出功率稳定性、频率响应预失真补偿以及整体设计等逐一加以分析, 并提出

解决方案. 测试结果表明光源带宽达到 40GHz, 可用于 40GHz 频率范围内光电子器件频率响应特性测试, 同时也满足 SDH/SONET 传输实验要求.

## 2 40GHz 宽带调制光源的设计

调制光源的基本功能为进行电光转换, 它主要由直流光源、电光调制以及射频放大三部分和外围辅助电路构成, 结构框图如图 1 所示. 其中, 直流激光器为 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器提供高功率的稳定光输入, 电信号经射频放大器放大并输入电光调制器, 偏置控制器对调制器的直流偏置、射频放大器的输入输出偏置以及增益进行调整, 以达到所需的要求. 由于光源由多部分组成, 因此每部分关键器件的选择至关重要, 对于仪器整体性能的好坏起着决定性作用. 为此, 我们选取 JDSU 公司的蝶形封装 DFB 激光器 CQF935/508 作为直流光源, 其最大输出功率高于 13dBm, 可达到调制器输入光功率的上限; 射频放大器选取 SHF 公司的 SHF806E; LiNbO<sub>3</sub> 电光

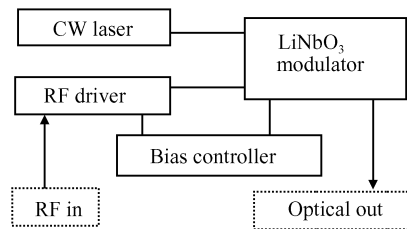


图 1 宽带调制光源结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of broadband light source

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60510173, 60536010, 60506006)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: nhzhu@semi.ac.cn

2006-06-21 收到, 2006-08-19 定稿

调制器为 COVEGA 公司的 40GHz 宽带模块 Mach-40. 同时, 由于光源工作在极高的调制速率下, 对各个模块的稳定性要求极高. 为保证高速光源的工作状态稳定可靠, 需要解决一些关键技术.

### 2.1 直流激光器稳态工作

激光器的工作状态的好坏, 直接影响着输出光功率和波长的稳定. 为蝶形封装 DFB 激光器设计的驱动电路示意图如图 2 所示. 利用激光器模块内背光探测器 (MPD) 的反馈光电流构成自动功率控制电路 (APC), 进而调整激光器偏置电流, 使激光器输出光功率恒定. 同时为了防止激光器损坏, 我们还设计了激光器软启动电路和过流保护、失效保护和关断功能的电路.

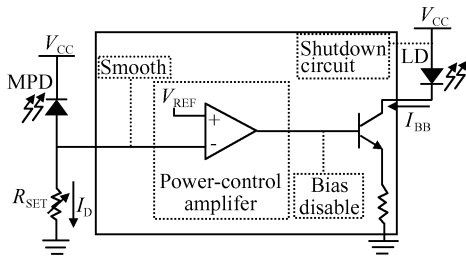


图 2 激光器驱动电路示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser driving circuit

激光器是一个对温度很敏感的器件, 工作温度对其工作特性有非常大的影响. 当环境温度发生变化, 不仅输出功率将发生很大变化, 其发射光谱的峰值波长也随着温度的变化而发生漂移. 对于 DFB 激光器, 温度每变化 1℃, 波长漂移约 10GHz, 这对于 DWDM 的应用来说是不能忍受的, 因此需要使激光器工作于恒温状态. 图 3 是温控电路示意图. 蝶型封装激光器带有负温度系数 (NTC) 的热敏电阻, 制冷电路检测热敏电阻阻值并和设定的阻值进行比较, 通过比例-积分-微分控制器 (PID) 反馈方式控制 TEC 制冷器的工作电流, 从而使激光器保持恒温. 由于激光器功率较大, 发热量也会随之增加, 制冷器需要消耗较大电流, 这里使用脉宽调制电路 (PWM)

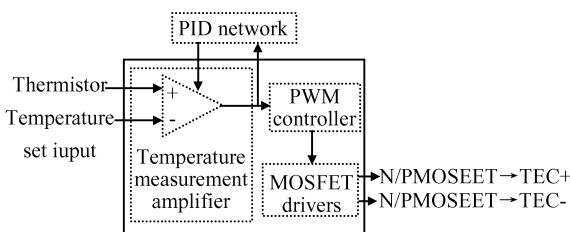


图 3 稳定光源温控电路示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser temperature control circuit

推动 MOSFET 对管提高电路效率. 为防止制冷器失效, 电路带有制冷器失效和热敏电阻失效保护. 图 4 给出了激光器采用温度控制前后的波长随环境温度的变化趋势.

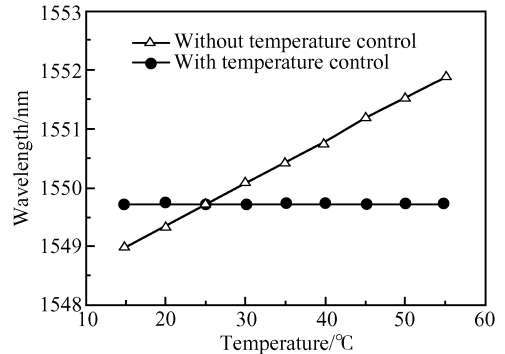


图 4 温控前后激光器波长随温度的变化

Fig.4 Wavelengths of laser with/without temperature control

### 2.2 LiNbO<sub>3</sub> 调制器工作点跟踪控制

本光源不仅适用于大信号数字传输系统, 还可用于小信号频率响应测试系统. 而在一些系统的小信号频率响应测试过程中, 有必要对 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器的偏置电压进行调节以选取合适的工作点<sup>[6]</sup>. 因此, 需要对调制器提供可调节的外加偏置电压, 以控制并稳定其工作点位置. 目前, 高速的 LiNbO<sub>3</sub> 调制器仍以传统的 Z 切割 (Z-cut) 为主, 其偏置电压会难以避免的产生热漂移, 并受到热电效应 (pyroelectric effect) 的影响<sup>[7,8]</sup>. 即随着温度的变化和器件内部静电电荷积累, 调制器的工作点会发生缓慢的漂移, 输出光功率和小信号频率响应曲线都会发生很大变化. 因此, 调制器工作点的跟踪稳定对仪器的稳定性和可靠性起着决定性的作用. 图 5 为调制器偏置电压控制示意图.

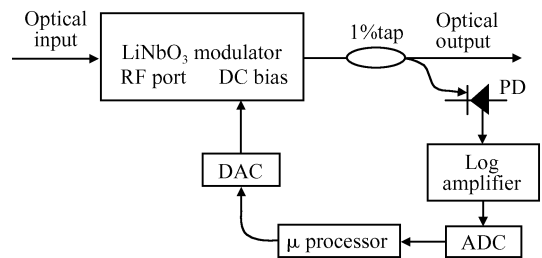


图 5 调制器偏置电压控制示意图

Fig.5 Schematic diagram of bias voltage control loop

调制器的输出光经过光耦合器, 取出其中的 1% 送到光电探测器, 用来反馈控制 LiNbO<sub>3</sub> 调制器的偏置电压. 这里所使用的光电探测器响应速率非常低, 对于高速信号不响应, 相当于一个低通滤波

器. 利用这一点, 可以保证它只反映光功率的时域平均值, 从而使控制电路只对直流工作点的变化产生响应. 由于光电流变化幅度非常小, 为了得到好的控制灵敏度和精度, 光电流通过对数放大器放大再送入 ADC 电路采样. 采样后的数据通过微处理器处理, 软件上采用 PID 算法, 以提高控制精度和响应速度. 微处理器通过 DAC 电路对调制器的偏置电压进行跟踪稳定控制, 以保证输出光功率的稳定.

### 2.3 频率响应预失真补偿

通常情况下, 调制器的频率响应特性不会呈现出理想的平坦特性. 因此, 通过调制器前端射频放大器的频率响应特性设计, 可以对调制器的频率响应进行预失真补偿. 射频放大器和调制器的级联网络如图 6 所示.

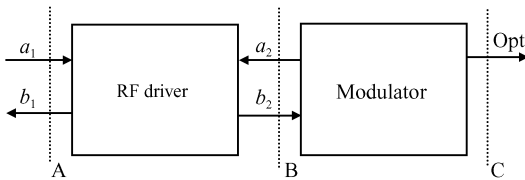


图 6 射频放大器和调制器级联网络

Fig. 6 Network combined with RF driver and modulator

根据二端口微波网络的  $S$  参数定义, 射频放大器的  $S$  参数通过矩阵表示为

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11}^{\text{Dr}} & S_{12}^{\text{Dr}} \\ S_{21}^{\text{Dr}} & S_{22}^{\text{Dr}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中  $a_i, b_i (i=1, 2)$  表示  $i$  端口的入射波和反射波. 而光电子器件的  $S$  参数定义与纯电网络有所不同<sup>[9]</sup>, 调制器的  $S$  参数表示为:

$$S^{\text{MD}} = \begin{pmatrix} S_{11}^{\text{MD}} & 0 \\ S_{21}^{\text{MD}} & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

射频放大器和调制器组成的级联网络散射传输矩阵可表示为:

$$T^{\text{DrMD}} = T^{\text{Dr}} T^{\text{MD}} \quad (3)$$

由  $T$  矩阵可转换成  $S$  矩阵的形式, 得到级联网络的  $S$  参数:

$$S^{\text{DrMD}} = \begin{pmatrix} \frac{S_{11}^{\text{Dr}} - S_{11}^{\text{MD}} (S_{11}^{\text{Dr}} S_{22}^{\text{Dr}} - S_{12}^{\text{Dr}} S_{21}^{\text{Dr}})}{1 - S_{22}^{\text{Dr}} S_{11}^{\text{MD}}} & 0 \\ \frac{S_{21}^{\text{Dr}} S_{21}^{\text{MD}}}{1 - S_{22}^{\text{Dr}} S_{11}^{\text{MD}}} & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

基于(4)式, 可以根据调制器的  $S$  参数来设计与调整射频放大器的频率响应特性, 以便对调制器的频率响应进行补偿, 以达到级联网络整体平坦的频率响应特性. 图 7 给出了调制器与射频放大器各自的频率响应曲线, 射频放大器着重补偿了调制器在高频处较为严重的下跌, 补偿后的效果参见图 10.

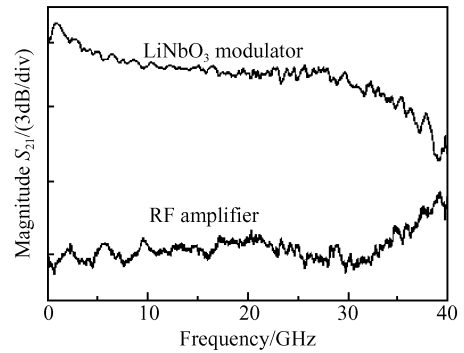


图 7 调制器与射频放大器的频率响应曲线

Fig. 7 Frequency responses of the modulator and the RF amplifier

### 2.4 光源整体设计

在 40GHz 宽带调制光源设计中, 由于微波调制信号速率极高, 所以合理的布局 and 连接显得尤为重要. 为了避免高频的微波电信号在传输过程中恶化, 采用走线最短原则. 射频放大器输出端和 LiNbO<sub>3</sub> 调制器的输入端之间利用射频连接器直接连接, 不通过波导管传输, 将损耗和干扰降到最小. 控制信号连接采用同轴电缆, 减小空间辐射耦合. 对某些可能存在辐射和易受干扰的电路部分进行空间电磁屏蔽, 并远离其他部件, 如激光器的制冷部分、单片机控制单元以及液晶显示单元等. 图 8 (a) 给出了光源的整体设计示意图, (b) 为光源外观图.

## 3 测试结果

对 40GHz 宽带调制光源的基本参数进行了测试.

首先是光源的静态特性. 图 9 给出了 Advantest Q8384 光谱分析仪所测光源在直流状态下的输出光谱. 从图上可以看出, 光源边模抑制比超过 50dB. 通过外差检测, 得到光谱线宽为 2MHz. 光源的最大输出光功率可达到 9dBm, 静态消光比大于 21dB.

其次是高速光源的小信号调制特性. 利用 Agilent 8722ET 网络分析仪, 结合 3dB 带宽为 55GHz 的 DSC-10ER 超高速光电探测器, 测得光源的小信号频率响应曲线如图 10 所示. 从图中可以看出, 该光源的反射系数  $S_{11}$  很小, 均在 -12dB 以下, 传输系数  $S_{21}$  较为平坦, 频率响应 3dB 带宽达到 40GHz. 由于采用的是 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器, 还可以利用小信号功率测试法<sup>[10]</sup> 消除频率响应中探测器的影响, 得到该光源的准确的频率响应, 作为其他宽带光电子器件小信号频响测试的基准.

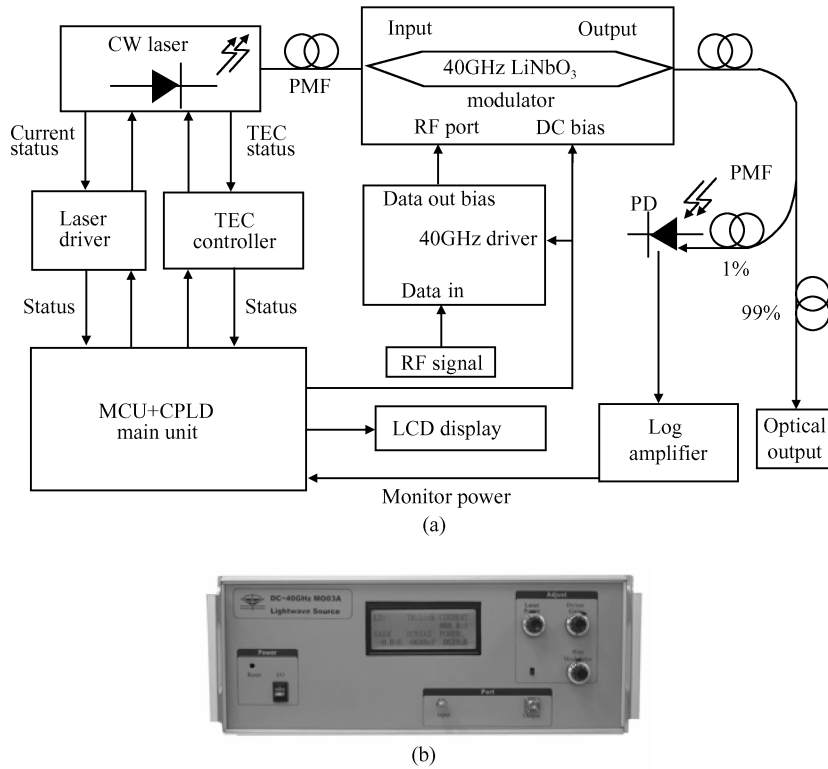


图 8 40GHz 宽带光源整体设计图(a)及外观图(b)

Fig. 8 40GHz broadband light source schematic diagram of design (a) and photograph (b)

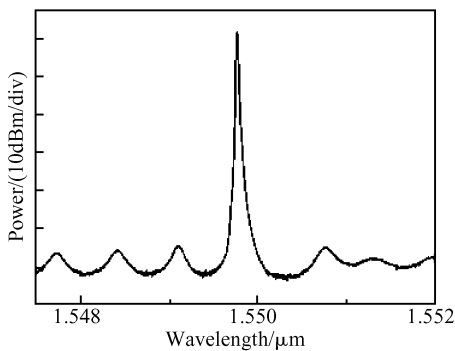


图 9 光源直流输出光谱

Fig. 9 Optical spectrum of light source

限于测试仪器条件,未能对 40Gbit/s 传输特性做出测试,在此给出 10Gbit/s 下的大信号测试结果以对光源的性能加以分析. 10Gbit/s 大信号测试系统包括伪随机码发生器(Advantest D3186)、误码仪(Advantest D3286)、光电探测器(OKI OD9241N)和通信分析仪(Tektronix CAS8000). 宽带光源的背对背眼图测试结果如图 11(a)所示,图 11(b)为相应的 10Gbit/s 电信号眼图. 图 12 给出了 G. 652 单模光纤传输误码率测试结果. 由于所使用的 LiNbO<sub>3</sub> 电光调制器的负啁啾系数为 -0.7,因此在 75km 以下的长距离传输时误码率要低于背对背时的情况, 100km 时通道代价小于 1dB.

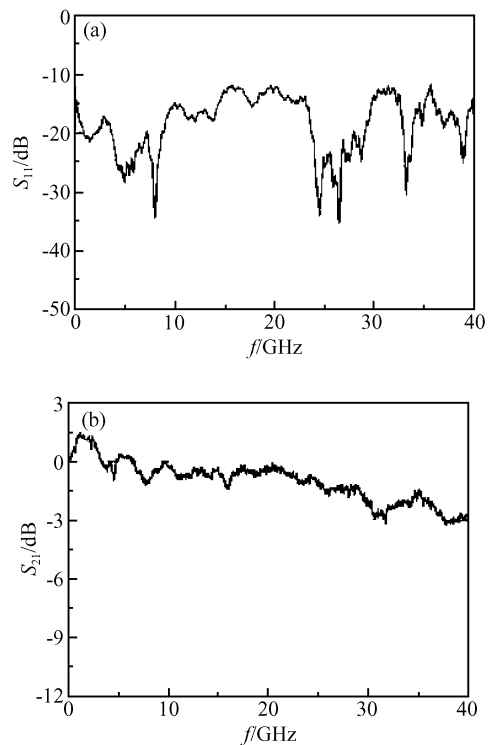


图 10 光源小信号频率响应曲线 (a)反射系数;(b)传输系数

Fig. 10 Frequency response of light source (a) S<sub>11</sub>; (b) S<sub>21</sub>

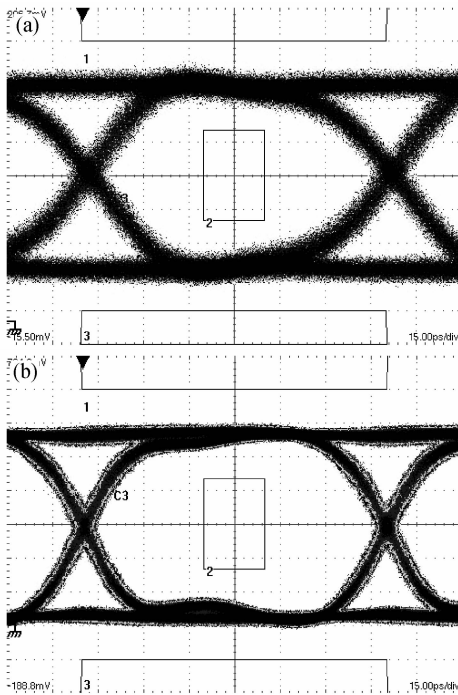


图 11 10Gbit/s 背对背眼图 (a) 宽带光源眼图; (b) 电信号眼图

Fig. 11 10Gbit/s back to back eye diagrams (a) Broadband light source eye diagram; (b) Electrical signal eye diagram

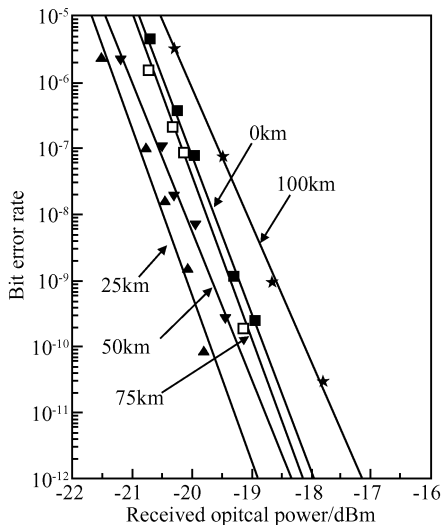


图 12 宽带光源的误码率(10Gbit/s)

Fig. 12 Bit-error-rate (BER) of broadband light source (10Gbit/s)

## 4 结论

成功研制了以  $\text{LiNbO}_3$  电光调制器为基础的宽带调制光源, 并对主要参数进行了测试. 光源 3dB 带宽达到 40GHz, 可用于 40GHz 频率范围内光电子器件频率响应特性测试, 同时也满足 SDH/SO-NET 传输实验要求. 并可用作高速光电转换器、光放大器以及其他无源器件的高频性能测试. 分析并解决了宽带调制光源设计中直流激光器稳态工作、调制器输出功率稳定性、频率响应预失真补偿以及整体设计等关键问题. 对基于电吸收调制器的宽带调制光源的研制具有借鉴意义.

## 参考文献

- [1] Bigo S, Bertain A, Chbat M W, et al. 320-Gb/s ( $32 \times 10$  Gb/s WDM) transmission over 500km of conventional single-mode fiber with 125-km amplifier spacing. *Photon Technol Lett*, 1998, 10(7): 1045
- [2] Sato K. Semiconductor light sources for 40-Gbs transmission systems. *J Lightwave Tech*, 2002, 20(12): 2035
- [3] Kjebon O, Schatz R, Lourduoss S, et al. 30GHz direct modulation bandwidth in detuned loaded InGaAsP DBR lasers at 1.55 $\mu\text{m}$  wavelength. *Electron Lett*, 1997, 33(6): 488
- [4] Noguchi K, Miyazawa H, Mitomi O. Frequency - dependent propagation characteristics of coplanar waveguide electrode on 100GHz Ti:  $\text{LiNbO}_3$  optical modulator. *Electron Lett*, 1998, 34(7): 661
- [5] Gu Jinghua, Wu Boyu. Design and optimization of ultra-broad-band  $\text{LiNbO}_3$  electro-optic modulators of novel electrode structures. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(12): 1073 (in Chinese) [谷京华, 吴伯瑜. 新型行波电极超宽带  $\text{LiNbO}_3$  电光调制器的优化设计. *中国激光*, 1997, 24(12): 1073]
- [6] Mitomi O, Noguchi K, Miyazawa H. Estimation of frequency response for high-speed  $\text{LiNbO}_3$  optical modulators. *IEE Proc Optoelectron*, 1999, 146(2): 99
- [7] Nagata H, Li Y, Finch A, et al. Bias point thermal shift growth in Z-cut  $\text{LiNbO}_3$  modulators. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2005, 17(6): 1184
- [8] Nayyer J, Nagata H. Suppression of thermal drifts of high speed Ti:  $\text{LiNbO}_3$  optical modulators. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1994, 6(8): 952
- [9] Hale P D, Williams D F. Calibrated measurement of optoelectronic frequency response. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2004, 51(4): 1422
- [10] Huang Hengpei, San Haisheng, Zhang Jiabao, et al. Measurement of  $\text{LiNbO}_3$  modulator frequency response using small-signal power measuring technique. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2006, 17(1): 37 (in Chinese) [黄亨沛, 伞海生, 张家宝, 等.  $\text{LiNbO}_3$  电光调制器的小信号功率测试法研究. *光电子·激光*, 2006, 17(1): 37]

## Design of 40GHz Broadband Light Source Based on LiNbO<sub>3</sub> Optical Modulator<sup>\*</sup>

Zhu Ninghua<sup>†</sup>, Huang Hengpei, Xie Liang, Liu Yu, and Zeng Xiongwen

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The design of a 40GHz broadband light source is presented. Key technologies of the light source are developed, including techniques for stabilizing the devices and compensating the frequency response distortion. A 40GHz broadband light source based on a LiNbO<sub>3</sub> optical modulator has been successfully manufactured. Experiments and tests show that the light source can be used not only for small signal frequency response measurement systems, but also for large signal SDH/SONET transmission test systems.

**Key words:** optical communication; broadband light source; LiNbO<sub>3</sub> optical modulator; frequency response

**EEACC:** 4250

**Article ID:** 0253-4177(2006)12-2178-06

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Foundation of China (Nos. 60510173, 60536010, 60506006)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: nhzhu@semi.ac.cn

Received 21 June 2006, revised manuscript received 19 August 2006