

40 Gb/s 微带线电极聚合物电光调制器

白一鸣¹ 曲欣² 王晓林² 王士杰² 吴伯瑜¹

(¹清华大学电子工程系, 北京 100084
²清华大学化工系高分子研究所, 北京 100084)

摘要 设计、制作和测试了用于 1.31 和 1.55 μm 光波长的 40 Gb/s 微带线行波电极的电光调制器。假设聚合物材料的电光系数 $\gamma_{33} = 30 \text{ pm/V}$, 设计的调制器性能参数分别是半波电压 $V_{\pi} = 4.92 \text{ V}$ 和调制带宽 42 GHz。用有完全自主知识产权的二阶非线性光学聚合物材料 BPAN-NT 作为芯层材料制作了聚合物电光调制器。对调制器的各项特性参数进行了直流、低频和微波的测试, 在 1.31 和 1.55 μm 波长上测得低频 (237 Hz) V_{π} 分别为 32.1 和 40.5 V, 折算得芯层材料的电光系数 $\gamma_{33} = 3.856 \text{ pm/V}$ 。测得消光比为 20 dB。在 50 MHz~40 GHz 频率范围内, 测得电极系统实际的微波损耗系数 $\alpha_0 = 0.6 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-1/2}$, 用此值理论计算得出调制带宽为 42.70 GHz。在 7.5~16.0 GHz 以及 32~40 GHz 频率范围内用光谱仪测量器件的调制度 M , 并获得调制度的频率响应曲线。3 dB 调制带宽为 30 GHz。

关键词 光电子学; 聚合物电光调制器; 微带线; 高速电光调制器; 电晕极化

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.121601

40 Gb/s Microstrip Line Polymer Electro-Optic Modulators

Bai Yiming¹ Qu Xin² Wang Xiaolin² Wang Shijie² Wu Boyu¹

(¹Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
²Institute of Polymer Science and Engineering, Department of Chemical Engineering,
 Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract 40 Gb/s polymer electro-optic modulators with microstrip line traveling-wave electrode are designed, fabricated and tested. Assuming that the electro-optic coefficient γ_{33} of the core polymer is 30 pm/V, the performance parameters of the designed modulator are half-wave voltage $V_{\pi} = 4.94 \text{ V}$ and modulation bandwidth 42 GHz. The modulator is fabricated using the second-order nonlinear optical polymer material BPAN-NT with a completely independent intellectual property as the core layer material of the polymer electro-optic modulator. After that, the performances of the modulators in direct current (DC), low frequencies and microwave regions are tested. The low-frequency (237 Hz) V_{π} values at 1.31 and 1.55 μm wavelengths are 32.1 and 40.5 V, respectively. The electro-optic coefficient of core layer material γ_{33} is thus obtained as 3.856 pm/V. The extinction ratio is measured to be 20 dB. Within the frequencies ranging from 50 MHz to 40 GHz, the actual measured microwave attenuation coefficient α_0 of the electrode system is $0.6 \text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-1/2}$. Using this value, the modulation bandwidth of the modulator is calculated to be 42.70 GHz. The modulation indices are measured by using optical spectrum analyzer in the frequency range from 7.5 to 16 GHz and from 32 to 40 GHz. And the frequency response curve of the modulation index M of the electro-optic polymer modulator is also obtained. The 3 dB bandwidth of the 40 Gb/s modulator is 30 GHz.

Key words optoelectronics; polymer electro-optic modulator; microstrip line; high speed electro-optic modulator; corona poling

OCIS codes 160.5470; 250.2580; 250.7360; 230.4110

收稿日期: 2011-08-31; 收到修改稿日期: 2011-09-05; 网络出版日期: 2011-10-25

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z409)资助课题。

作者简介: 白一鸣(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: bym10@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 吴伯瑜(1939—), 男, 教授, 主要从事微波电子学器件和信息光电子学器件与系统方面的研究。

E-mail: wuby@tsinghua.edu.cn

1 引言

聚合物材料具有电光系数高、介电常数低、易实现光波与微波相速匹配、制作工艺与硅半导体工艺兼容、易于实现大面积和大规模光学集成等优点。目前单层极化聚合物薄膜的电光系数 γ_{33} 已达 $450 \text{ pm/V}^{[1]}$, 做成器件的聚合物薄膜电光系数也有 $110 \sim 140 \text{ pm/V}^{[2]}$, 材料极化效率与热稳定性之间的矛盾也在一定程度上得到解决^[3]。得益于材料性能的大幅提高, 已分别有半波电压低至 0.25 V 、调制带宽超过 185 GHz 的聚合物电光调制器的报道^[4,5]。本文采用有完全自主知识产权的清华大学化学工程系研制的聚合物材料 BPAN-NT/M20S, 研制了带宽 40 GHz 的马赫-曾德尔(M-Z)微带线(MSL)结构的行波电极聚合物电光调制器。对相互作用区长度 $L = 37 \text{ mm}$ 的调制器电极系统微波特性测试结果表明, 其微波损耗系数 $\alpha_0 = 0.6 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{GHz}^{-1/2}$, 由此可以得到调制器的理论调制带宽为 42.7 GHz 。测得调制器的消光比为 20 dB , 在 1.31 和 $1.55 \text{ }\mu\text{m}$ 波长上测得低频半波电压 V_π 分别为 32.1 和 40.5 V 。用光谱仪观测到了调制器在 1.342 和 $1.557 \text{ }\mu\text{m}$ 波长不同频率微波调制信号下的电光调制现象。受实验室仪器设备的条件限制, 对于 40 Gb/s 电光强度调制器, 3 dB 小信号调制带宽为 30 GHz 。在 $7.5 \sim 40.0 \text{ GHz}$ 的一些频段, 用光谱仪测量了不同微波频率和不同微波驱动功率器件的调制度 M , 并由此获得了归一化驱动功率值为 100 mW 时电光调制器调制度的频率响应曲线。

2 调制器的设计

聚合物电光调制器光波导一般采用三层脊形光波导结构, 如图 1 所示, 包括下包层、上包层以及能够通过极化而具有电光效应的芯层。为了保证脊型光波导单模传输, 利用等效折射率方法计算^[6], 选定脊波导宽 $W_{\text{rib}} = 6 \text{ }\mu\text{m}$, 脊高 $H_{\text{rib}} = 0.45 \text{ }\mu\text{m}$, 脊波导间距 $G_{\text{rib}} = 103 \text{ }\mu\text{m}$ 。在工作光波长 $1.55 \text{ }\mu\text{m}$, 以 BPAN-NT/M20S 和 BPAN/M20S 分别作为光波导芯层和包层的材料, 其中芯层厚度为 $1 \text{ }\mu\text{m}$, 上下包层厚度各为 $5 \text{ }\mu\text{m}$ 。在 $1.55 \text{ }\mu\text{m}$ 波长处用有限元法计算得光波导的光等效折射率 $N_0 = 1.624$ 。衬底通常采用低损耗玻璃、石英或高阻硅片。实验中, 采用石英和高阻硅作为衬底。

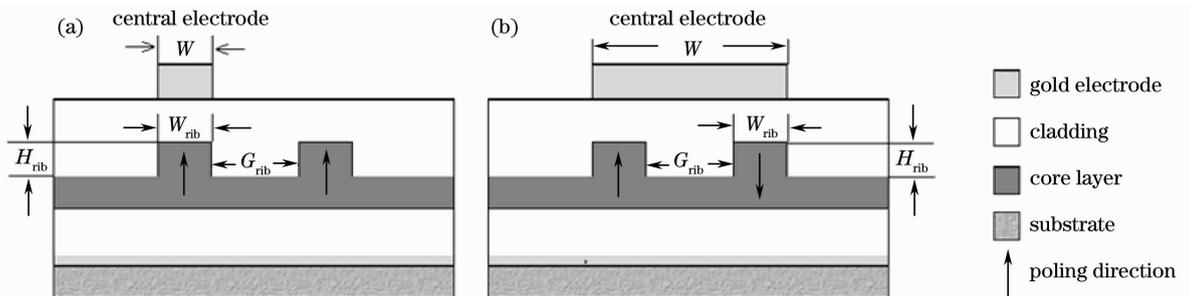


图 1 (a)电晕极化单臂 MSL 电极调制器和(b)接触极化双臂 MSL 电极调制器相互作用区截面图

Fig. 1 Cross section in interactive region for (a) single waveguide modulator with MSL electrode for corona poling and (b) double waveguide modulator with MSL electrode of contact poling

聚合物光波导 M-Z 电光强度调制器的电极系统采用微带线行波电极结构。器件相互作用区截面图如图 1 所示, 中心电极的宽度为 W , 长度为 L 。俯视图如图 2 所示。对于聚合物光波导 M-Z 干涉仪的两个臂采用电晕极化法可获得同向极化[图 1(a)], 而采用接触极化法可获得两个臂的反向极化[图 1(b)]。使用接触极化方法使其可以用一条微带线实现对两臂的反相调制, 理论上可以得到更低的半波电压, 但制作难度较大。综合考虑聚合物调制器各项性能参数, 如行波电极特性阻抗 Z_m 、微波等效折射率 N_m 、调制器的半波电压 V_π 以及 3 dB 带

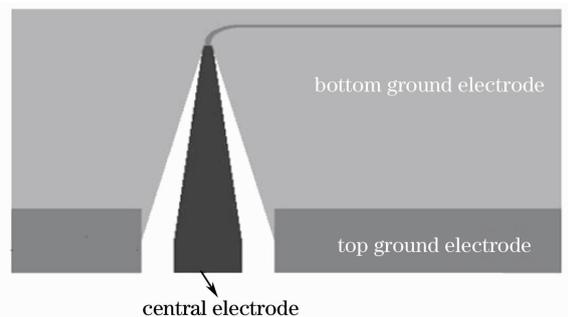


图 2 MSL 电极

Fig. 2 MSL electrode

宽 W_b , 用自行研制的光波导软件和聚合物行波型电光调制设计计算软件优化, 在工作光波长 $1.55 \mu\text{m}$, 聚合物芯层材料的电光系数 $\gamma_{33} = 30 \text{ pm/V}$ 时, 得到用以高阻硅和石英为衬底材料的电极各部分的结构尺寸及性能理论计算结果^[7], 表 1 所示为相互作用区的特性参数。

表 1 MSL 电极结构的电光调制器重要参数理论计算结果

Table 1 Theoretical value of important parameters for modulators with MSL electrodes

No.	Electrode	L/mm	$W/\mu\text{m}$	N_m	Z_m/Ω	$\alpha_0/(\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{GHz}^{-1/2})$	V_π/V	W_b/GHz
1	Single MSL	37.0	20	1.6081	50.84	0.575	4.94	42
2	Double MSL	27.2	37	1.6598	66.52	0.585	3.56	>45
3	Double MSL	27.2	32	1.6480	72.58	0.641	3.56	>83

3 调制器的制作

用清华大学化学工程系研制的环氧聚合物 BPAN-NT(结构式如图 3 所示)和 BPAN 分别作为芯层和包层的主要材料, 并利用异氰酸酯 M20S 作为交联剂。双组分非线性光学聚合物体系 BPAN-NT/M20S 极化薄膜具有较好的二阶非线性电光系数, d_{33} 可达 105.2 pm/V , 并具有很好的热稳定性, d_{33} 在 200°C 高温下仍保持在原值的 80% 左右, 制备周期短, 成膜性优良^[8]。

通过旋涂聚合物薄膜、反应离子刻蚀的方法制作脊波导, 电晕极化使芯层具有电光效应, 并采用电镀方法制作厚行波电极等工艺制作了 QB57, QB58 等一系列 MSL 电极聚合物电光调制器。调制器的详细制作过程参见文献^[9]。

4 调制器性能的测试

用 Agilent 8722ET 40 GHz 微波网络分析仪测试了 QB57, QB58 电光调制器[结构尺寸如图 1(a)所示]的微波特性, 被测的调制器芯片装在带有 K 连接器的黄铜基座上(图 4), K 连接器作为微波输入输出端的接口。图 5 给出高阻硅衬底上的相互作用区长度 $L = 37 \text{ mm}$ 行波电极系统的 S 参数, 其中 S_{12} 为传输损耗, 它的大小限制了调制器的调制带宽; S_{22} 代表微带输入端口的微波反射特性, 在绝大部分频率范围内 $S_{22} < -8 \text{ dB}$, 即最大的微波反射功率不超过入射功率的 16%。

在 1.31 和 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处对调制器的直流、低频和微波电光特性进行测试。测得低频半波电压 V_π 分别为 32.1 V (图 6)和 40.5 V , 折算得芯层材料的电光系数 γ_{33} 分别为 3.856 和 3.660 pm/V , 并测得消光比为 20 dB 。相应的半波电压与折算材料电光系数见表 2, 表 3。

对于 40 Gb/s 电光强度调制器, 其 3 dB 小信号调制带宽为 30 GHz 。在测量器件的 3 dB 小信号调制带宽时, 由于制作的器件半波电压太大, 无法用常规的扫频法(由微波网络分析仪和高速光电探测器等组成系统)测量

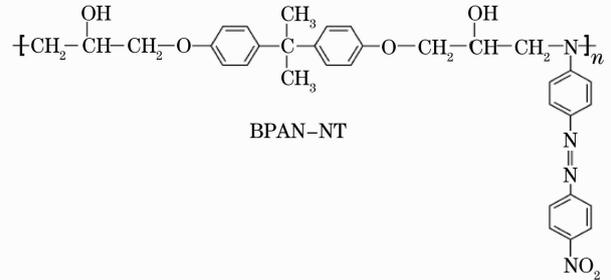


图 3 芯层材料 BPAN-NT 结构式

Fig. 3 Chemical structure of active polymer core material BPAN-NT

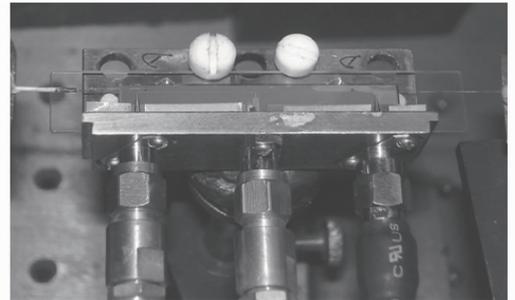


图 4 调制器在测试系统上

Fig. 4 A modulator in test

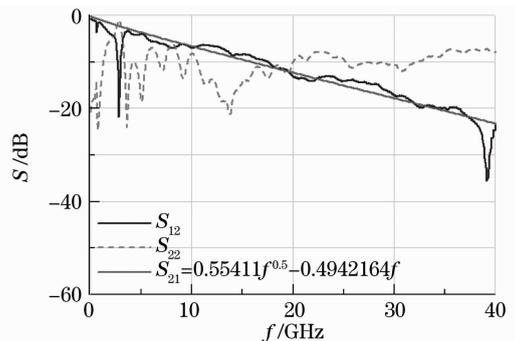


图 5 40 GHz 调制器电极系统的微波特性图。

QB58 石英玻璃衬底

Fig. 5 Microwave properties of the electrode system of 40 GHz modulator. QB58 on quartz glass substrate

器件的小信号调制度的频率响应曲线。因此,采用微波信号源提供的单频信号经微波放大器放大到几百毫瓦的微波功率来驱动此调制器,由光谱仪检测被调制光的光谱中是否含有此频率的调制光,即对应此调制频率的旁瓣。

利用光谱仪测试法^[10]测量了调制器在 1.342 和 1.557 μm 光波长,不同微波频率、不同驱动功率下的调制光谱,测试系统框图如图 7 所示。由于聚合物光波导的传输损耗较大,要求有几十毫瓦的激光功率输入,故 1.55 μm 激光源是半导体单模分布式反馈激光二极管 (DFB-LD) 和掺铒光纤放大器 (EDFA) 组成的,1.34 μm 激光源是采用双模 Nd:YVO₄ 中功率固体激光器。微波驱动源在 7.5~16.0 GHz 频段用宽带功率行波管作功放,32~40 GHz 频段用宽带砷化镓晶体管作功放。

表 2 聚合物电光调制器 QB57 的半波电压

Table 2 Half-wave voltage of QB57 polymer electro-optic modulators

Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	MSL traveling-wave electrode		Bias electrode	
	V_{π} (TM mode) /V	V_{π} (TE mode) /V	V_{π} (TM mode) /V	V_{π} (TE mode) /V
1.31	32.1	90.2	50.7	145.9
1.55	40.5	120.7	71.2	205.0

表 3 聚合物电光调制器 QB57 芯层电光系数

Table 3 Core layer electro-optic coefficients of QB57 polymer electro-optic modulators

Wavelength $\lambda / \mu\text{m}$	Halfwave voltage V_{π}/V	Length of electrode L / mm	Core layer electro-optic coefficient $\gamma_{33}/(\text{pm}/\text{V})$
1.31	32.1	37.0	3.856
1.31	50.7	20.0	4.516
1.55	40.5	37.0	3.659
1.55	71.2	20.0	3.851

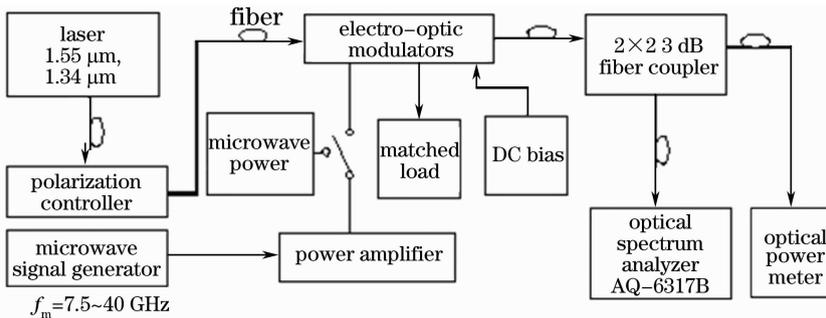


图 7 光谱仪测 M-Z 电光调制器调制度频率响应的系统框图

Fig. 7 System block diagram for frequency response modulation measurement of M-Z electro-optic modulators with optical spectrum analyzer

图 8 和图 9 分别为在 1.342 和 1.557 μm 光波长测得的典型微波调制光的光谱图。由各频率点的主瓣与旁瓣比值,可计算得该频率 f_m 和该驱动功率 P_{dr} 下的调制度。

对驱动功率 P_{dr} 归一化,便可得到在 $P_{\text{dr}}=100 \text{ mW}$ 时的调制度频率响应,如图 10 所示。40 Gb/s 微波带行波型聚合物光波导电光强度调制器的 3 dB 调制带宽的上限频率为 30 GHz。由图 10(a)可见,在 $f=8 \text{ GHz}$ 的调制度 $M=0.11 \text{ rad}$,而在 $f=30 \text{ GHz}$ 的调制度 $M=0.08 \text{ rad} > 0.055 \text{ rad}$ 。故它达到 40 Gb/s 电光强度调制器的 3 dB 小信号调制带宽。

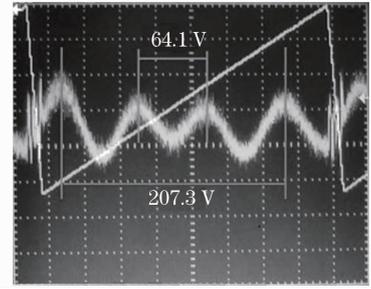


图 6 QB57 的典型调制波形图 ($\lambda=1.31 \mu\text{m}$, TM 模)

Fig. 6 Typical waveforms of modulator QB57 ($\lambda=1.31 \mu\text{m}$, TM mode)

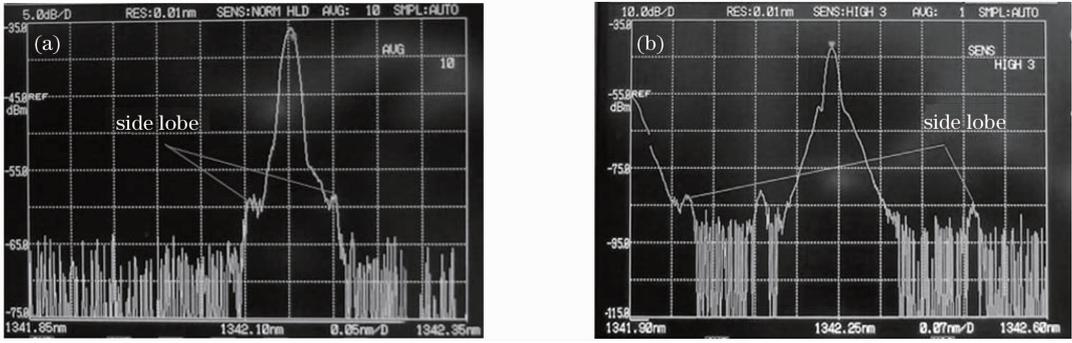


图 8 典型微波调制光的光谱图, $\lambda=1.342 \mu\text{m}$. (a) $f_m=7.5 \text{ GHz}$, $P_{\text{dr}}=622 \text{ mW}$, $M=0.3 \text{ rad}$;

(b) $f_m=40.15 \text{ GHz}$, $P_{\text{dr}}=66.8 \text{ mW}$, $M=0.03476 \text{ rad}$

Fig. 8 Typical spectra of modulated light, $\lambda=1.342 \mu\text{m}$. (a) $f_m=7.5 \text{ GHz}$, $P_{\text{dr}}=622 \text{ mW}$, $M=0.3 \text{ rad}$;

(b) $f_m=40.15 \text{ GHz}$, $P_{\text{dr}}=66.8 \text{ mW}$, $M=0.03476 \text{ rad}$

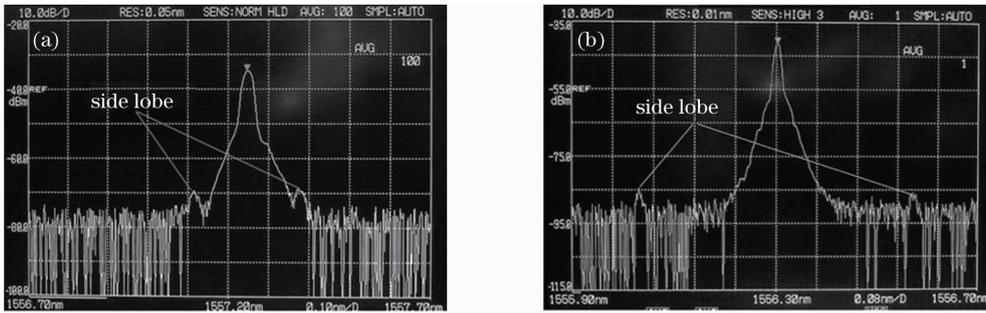


图 9 典型微波调制光的光谱图, $\lambda=1.557 \mu\text{m}$. (a) $f_m=16 \text{ GHz}$, $P_{\text{dr}}=245 \text{ mW}$, $M=0.0771 \text{ rad}$;

(b) $f_m=33.07 \text{ GHz}$, $P_{\text{dr}}=239 \text{ mW}$, $M=0.0264 \text{ rad}$

Fig. 9 Typical spectra of modulated light, $\lambda=1.557 \mu\text{m}$. (a) $f_m=16 \text{ GHz}$, $P_{\text{dr}}=245 \text{ mW}$, $M=0.0771 \text{ rad}$;

(b) $f_m=33.07 \text{ GHz}$, $P_{\text{dr}}=239 \text{ mW}$, $M=0.0264 \text{ rad}$

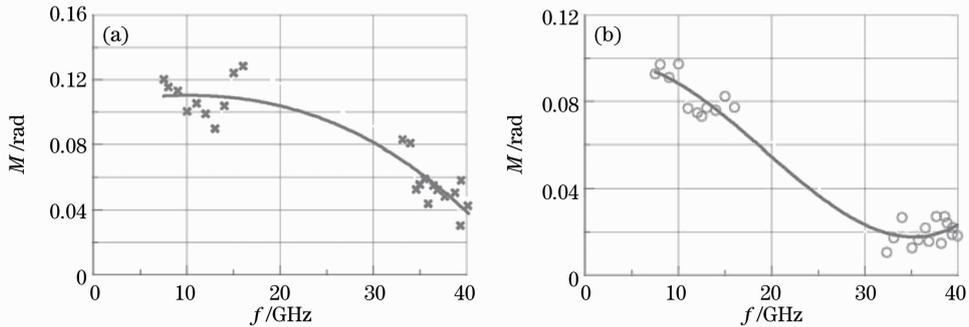


图 10 40 Gb/s 微波带线行波电极聚合物电光调制器的调制度频率响应。(a) $\lambda=1.342 \mu\text{m}$; (b) $\lambda=1.557 \mu\text{m}$

Fig. 10 Frequency response of modulation for polymer electro-optic modulators with 40 Gb/s MSL

traveling-wave electrode. (a) $\lambda=1.342 \mu\text{m}$; (b) $\lambda=1.557 \mu\text{m}$

5 结 论

用聚合物材料 BPAN-NT 设计制作了 MSL 行波电极电光调制器,对调制器的各项特性参数进行了测试。在 $1.31 \mu\text{m}$ 光波长上低频半波电压 $V_\pi=32.1 \text{ V}$,由此算得芯层材料的电光系数 $\gamma_{33}=3.856 \text{ pm/V}$,同时测得消光比为 20 dB。在 $7.5\sim 40.0 \text{ GHz}$ 的微波频率用光谱仪测量了器件的调制度频率响应。由实测调制度频率响应推算,制作的 40 Gb/s MSL 聚合物光波导电光调制器的 3 dB 小信号调制带宽达到所需的 30 GHz。进一步的研究工作将集中在改进聚合物的极化工艺、改善材料的电光系数和采用接触极化系统进行极化等以降低半波电压。同时还将研究采用合适的、介质损耗系数小的包层材料和衬底材料,以减小高频

下电极系统的微波损耗, 进一步增加调制带宽。

参 考 文 献

- 1 Yuriy V. Pereverzev, Kim N. Gunnerson, Oleg V. Prezhdo *et al.*. Guest-host cooperativity in organic materials greatly enhances the nonlinear optical response[J]. *J. Phys. Chem. C*, 2008, **112**(11): 4355~4363
- 2 Marnie Haller, Jingdong Luo, Hongxiang Li *et al.*. A novel lattice-hardening process to achieve highly efficient and thermally stable nonlinear optical polymers[J]. *Macromolecules*, 2004, **37**(3): 688~690
- 3 Y. Enami, J. Luo, A. K.-Y. Jen *et al.*. Hybrid cross-linkable polymer/sol-gel waveguide modulators with 0.65 V half wave voltage at 1550 nm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(9): 093505
- 4 Tom Baehr-Jones Boyan Penkov, Jingqing Huang, Phil Sullivan *et al.*. Nonlinear polymer-clad silicon slot waveguide modulator with a half wave voltage of 0.25 V[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(8): 081101
- 5 Mark Lee, Howard E. Katz, Christoph Erben *et al.*. Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer[J]. *Science*, 2002, **298**(5597): 1401~1403
- 6 Zhang Bing, Wu Boyu. Design of optical ridge waveguide in polymer devices[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(5): 445~448
张 兵, 吴伯瑜. 聚合物脊形光波导设计[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(5): 445~448
- 7 Haibo Peng, Boyu Wu, Qiong Song *et al.*. Hybrid electrodes used in polymer electro-optic modulator with ultra-broadband [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2003, **24**(9): 1587~1596
- 8 Yu Zhibin, He Yaning, Wang Xiaogong *et al.*. Isocyanate crosslinked epoxy-based second-order nonlinear optical polymers [J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2004, (3): 345~349
余志滨, 和亚宁, 王晓工 等. 异氰酸酯交联的环氧树脂基二阶非线性光学聚合物[J]. 高分子学报, 2004, (3): 345~349
- 9 Chen Wang, Liang Kun, Wu Boyu *et al.*. CPW traveling-wave electrode polymeric electro-optic modulator[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(6): 645~649
陈 旺, 梁 琨, 吴伯瑜 等. 聚合物共面波导行波电极电光调制器[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(6): 645~649
- 10 Yi Hong, Wu Boyu, Zhou Weiqin *et al.*. Measurement of the modulation index of a M-Z electro-optical modulator using an optical spectrum analyzer[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, **42**(1): 4~6
易 鸿, 吴伯瑜, 周伟勤 等. 用光谱仪测量 M-Z 电光调制器的调制指数[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, **42**(1): 4~6