

基于扣除法的电吸收调制器本征特性分析方法

哈森其其格 张 昀 刘 宇 谢 亮 祝宁华

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

摘要 基于电吸收调制器的工作原理和等效电路模型对调制器的高频响应特性进行分析, 提出了一种采用频率响应扣除法提取有源区本征响应的仿真新方法. 该方法能简单地去掉封装网络、夹具及光探测仪器等带来的影响, 用该方法得到了待测 InGaAs/InAlAs 材料电吸收调制器准确的高频本征响应特性.

关键词 电吸收调制器; 本征频率响应; 扣除法; 曲线拟合

中图分类号 TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092910.2881

Intrinsic Frequency Response Extraction of Electroabsorption Modulators

Hasen Qiqige Zhang Yun Liu Yu Xie Liang Zhu Ninghua

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

Abstract A new method for extracting intrinsic response of electro-absorption modulator is proposed, which is based on the analysis of modulation principle and equivalent circuit model. This method can simply remove the effects of the parasitic network, test fixtures and optical detectors. We can get the accurate intrinsic response of InGaAs/InAlAs electro-absorption modulator using our proposed technique.

Key words electroabsorption modulator(EAM); intrinsic frequency response; subtraction method; curve fitting

1 引 言

电吸收半导体光调制器由于其体积小、带宽大、效率高、驱动电压低以及便于与激光器、放大器和光检测器等其它器件集成等优点, 已经成为高速光通信系统中的关键器件, 在波分复用和时分复用系统中有广泛应用^[1~4]。调制器的动态特性决定了整个通信系统的指标, 而小信号调制响应则是表征调制器动态特性的重要性能参数。调制器的频响是由它的有源区的本征频响和封装寄生网络的响应共同决定的, 而封装寄生网络的响应可以通过优化设计减小, 那么调制器响应的上限应该是由它的本征频响决定。测量得到的调制器的响应包含封装网络、

夹具、及光探测仪器的影响, 为了得到调制器的本征频响, 就必须要去掉封装网络和夹具等带来的影响。

本文基于频率响应扣除法^[5,6], 通过将调制器工作原理分析与等效电路分析结合, 提出了一种新的提取调制器有源区本征响应和模拟整体调制特性的仿真方法。该方法能简单地去掉寄生网络和夹具等带来的影响, 文中给出了测试与仿真结果的对比以验证该仿真方法的正确性。

2 原 理

2.1 电吸收调制器的归一化频响

图 1 给出了电吸收调制器(EAM)的横截面示

收稿日期: 2009-04-30; 收到修改稿日期: 2009-08-21

基金项目: 国家 973 计划(2006CB604902, 2006CB302806)、国家自然科学基金(60510173, 60536010, 60536006, 60606019)和科技部重大国际合作项目(2006DFA11880)资助课题。

作者简介: 哈森其其格(1986—), 女, 蒙族, 博士研究生, 主要从事高速光电子器件高频特性方面的研究工作。

E-mail: hasen@semi.ac.cn

导师简介: 祝宁华(1959—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事微波光电子器件的封装与测试等方面的研究。

E-mail: nhzhu@semi.ac.cn

意图,它的调制区是一个 pin InGaAs/InAlAs 波导。

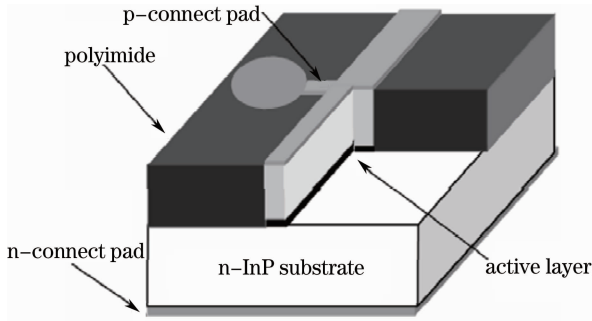


图 1 电吸收调制器的结构示意图

Fig. 1 Cross section of the completed EAM

电吸收调制器的等效电路如图 2 示,在这个模型中,调制器的光电流被等效为一条电流源,这条电流源由一个等效电阻 $R_J = (dI_O/dV_J)^{-1}$ 表示, I_O 表示光生电流, V_J 表示结的直流电压; R_S 为电吸收调制器的串联电阻(包括掺杂半导体层的体电阻和欧姆接触电阻); C_J 为结电容, C_P 为压焊点的寄生电容; R_{con} 和 L_M 分别为压焊金丝的电阻和电感。图中虚线框内的部分就是电吸收调制器的本征部分,我们知道,当进行小信号频率响应测试时,电输入信号和光输出信号可以分解为直流分量和频率为 ω 的交流分量之和,其中 ω 为调制的微波信号的频率。电吸收调制器的频率响应定义为输出光强中 ω 频率分量幅值与输入电压 ω 频率分量幅值的比值,而输出光强与结电压成比例关系,因此电吸收调制器的本征响应定义为 C_J 两端的电压 ω 频率幅值与 C_P 两端的电压 ω 频率幅值之比。

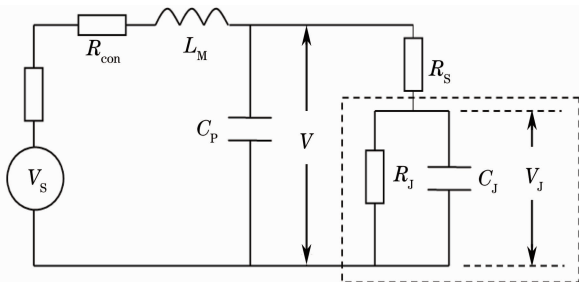


图 2 电吸收调制器的射频等效电路

Fig. 2 RF equivalent circuit model for EAM

通过等效电路,可以得到电吸收调制器的近似归一化本征频率响应特性

$$G(\omega) = \frac{V_J}{V} = 10 \lg \left| 1 / \left(1 + \frac{R_S}{R_J} + i\omega R_S C_J \right) \right|^2, \quad (1)$$

其中 R_S 与外加偏置电压无关, R_J 与偏置电压有关,但二者的比值 R_S/R_J 很小,所以从(1)式中可以看出 R_J 的变化对频率响应影响较小。决定因素主要是有源区的结电容 C_J , C_J 可近似表示为^[7]

$$C_J = S_M \sqrt{\frac{\epsilon_{r1} \epsilon_0 q N_A N_D}{2(N_A - N_D)(V_D - V)}} = \frac{C_{J0}}{\sqrt{1 - (V/V_D)}}, \quad (2)$$

式中 S_M 为电吸收调制器脊波导电极下面的有源区 p-n 结的面积, ϵ_{r1} 为有源区材料的相对介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, q 为电子电荷, N_A 和 N_D 分别为 p 区和 n 区受主和施主杂质浓度, V_D 和 V 分别为 p-n 结的内电场所致的电势差和外加电势差(反向偏置时取负值), C_{J0} 为零偏压下结电容。

2.2 测量结果与本征频响的关系

2.1 节是从电路模型简单推导得到调制器的近似归一化本征频率响应。而对于平时实际测量得到的则是带有其它寄生参数以及探测器影响的非归一化响应特性。假设调制器外部所加调制电压为

$$V_s = V_0 + V_m \cos(\omega_m t), \quad (3)$$

其中 V_0 是直流偏置电压, V_m 为频率为 ω_m 频率成分的幅值。则加到 C_J 两端的电压可表示为

$$V(\omega_m) = F(\omega_m) V_s(\omega_m), \quad (4)$$

式中 $F(\omega_m)$ 表示封装寄生网络的电传输特性。电吸收调制器的输出光强可表示为

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\Gamma_m a L), \quad (5)$$

式中 P_{in} 是输入光强, Γ_m 是有源区的光限制因子, L 为有源区的长度, a 是吸收系数,它随结电压的变化规律可用下面的经验公式表示^[8]:

$$\alpha(V) = \frac{\alpha_p(V) [\Delta\lambda(V)/2]^2}{[\lambda - \lambda_p(V)]^2 + [\Delta\lambda(V)/2]^2}, \quad (6)$$

其中 V 是作用在有源区的结电压, $\alpha_p(V)$ 是峰值吸收系数,具体表示为 $\alpha_p(V) = \alpha_0 \times (1 + V/24)$, $\lambda_p(V)$ 为吸收峰对应的波长,表示为 $\lambda_p(V) = \lambda_{p0} - 4 \times 10^{-9} V$, $\Delta\lambda(V)$ 为光谱展宽,表示为 $\Delta\lambda(V) = (10 - 1.28 \times V^3) \times 10^{-9}$ 。将(4)式代入(6)式,并按 Taylor 级数展开:

$$\alpha = \alpha(F_0 V_0) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{i!} \frac{\partial^i \alpha}{\partial V^i} \Big|_{V=F_0 V_0} [V_m F(\omega_m) G(\omega_m) \cos(\omega_m t)]^i, \quad (7)$$

由于频率响应测试为小信号测试,即 V_m 很小,因此可以忽略(7)式中二阶以上的高阶项,并代入(5)式,得到

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \exp \left\{ -\Gamma \left[\alpha(F_0 V_0) + \frac{\partial \alpha}{\partial V} \Big|_{V=F_0 V_0} V_m F(\omega_m) G(\omega_m) \cos(\omega_m t) \right] L \right\}, \quad (8)$$

也将式(8)按 Taylor 展开, 忽略高次项, 就可以得到输出光强中 ω_m 频率分量的表达式为

$$P_m = P_{\text{in}} \exp[-\Gamma L \alpha(F_0 V_0)] \Gamma L \frac{\partial \alpha}{\partial V} \Big|_{V=F_0 V_0} V_m F(\omega_m) G(\omega_m) \cos(\omega_m t). \quad (9)$$

通过测量可以得到电吸收调制器的频率响应系数 S_{21}^{EA} 。最后得到电吸收调制器的归一化本征频率响应系数 $G(\omega_m)$ 与电吸收调制器的频率响应系数测试结果的关系为

$$\begin{aligned} S_{21}^{\text{EA}} &= 20 \lg \left(\frac{P_m}{V_m \cos(\omega_m t)} \right) + S_{21}^{\text{PD}} \\ &= 20 \lg \left\{ P_{\text{in}} \exp[-\Gamma L \alpha(F_0 V_0)] \Gamma L \frac{\partial \alpha}{\partial V} \Big|_{V=F_0 V_0} F(\omega_m) G(\omega_m) \right\} + S_{21}^{\text{PD}}. \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 扣除法获得本征响应

从(10)式可以看出, 与调制电压无关的有封装寄生网络的传输特性和探测器的频率响应特性。由此, 通过不同偏置电压下的响应特性的相互扣除, 可以得到电吸收调制器的本征响应曲线与实际测量响应曲线的关系。当测量的散射参数以 dB 作为单位时, 不同偏置电压下的响应曲线相减得到下面关系式:

$$S_{21}^{\text{EA}}(V_1) - S_{21}^{\text{EA}}(V_2) = 20 \lg \left\{ \frac{\exp[-\Gamma L \alpha(F_0 V_1)] \Gamma L \frac{\partial \alpha}{\partial V} \Big|_{V=F_0 V_1} G(\omega_m, V_1)}{\exp[-\Gamma L \alpha(F_0 V_2)] \Gamma L \frac{\partial \alpha}{\partial V} \Big|_{V=F_0 V_2} G(\omega_m, V_2)} \right\}. \quad (11)$$

从(11)式可清楚地看到, 由测量所得到的实际响应曲线, 通过拟合的方式, 可以确定(1)式中的物理常数。因此可以得到电吸收调制器的本征响应曲线。

3 实验数据及结果

选择 HP8722ET 网络分析仪(40 G)对激光器高频响应进行测试与比较。实验中先用 HP85052D 标准对网络分析仪和偏置网络(Bias T)进行全双端口短路-开路-匹配-直通(SOLT)方法校准^[9,10], 校准后对实验样品进行测试, 图 3 给出了在不同偏压下测量得到的频响曲线, 图 4 给出了所扣除的响应。通常为了方便起见, 总是从大偏置电压下的响应中减去小偏置电压下的响应(这里为了方便拟合, 没有

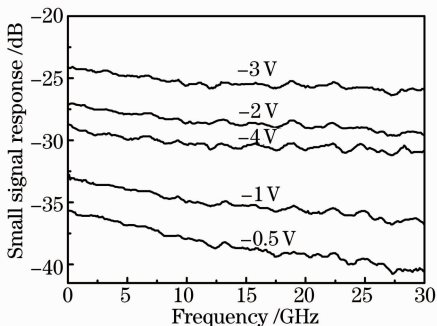


图 3 电吸收调制器在不同偏压下测量的频率响应

Fig. 3 Measured frequency responses of EAM at different bias voltages

使用 dB 作单位), 通过拟合得到的物理参数见表 1, 再通过(1)式, 就可以得到电吸收调制器的本征频率响应。图 5 给出了电吸收调制器的本征响应曲线。

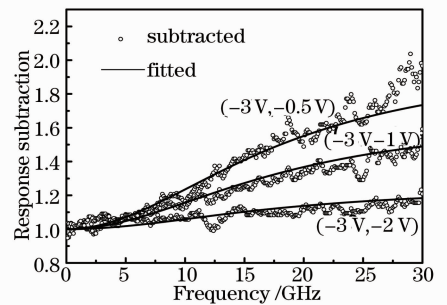


图 4 电吸收调制器频响扣除的拟合结果

Fig. 4 Measured and calculated results for the subtracted frequency response

表 1 电吸收调制器的物理参数

Table 1 Parameters of EAM

Parameter	Value
R_j / Ω	1000
R_s / Ω	4
C_{j0} / pF	22
V_D / V	2.02
$a_0 / \mu\text{m}^{-1}$	0.3
$\lambda_{p0} / \mu\text{m}$	1.525

4 结 论

本文基于电吸收调制器的工作原理和等效电路

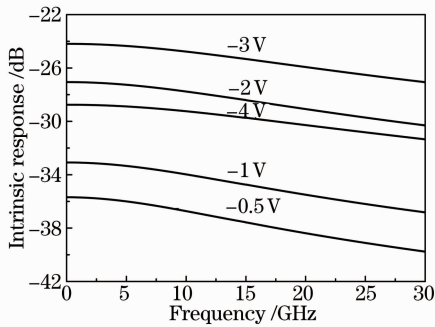


图 5 电吸收调制器在不同偏压下测量的本征频响

Fig. 5 Intrinsic frequency responses of the EAM under different bias

模型对调制器的高频响应特性进行分析,提出了一种采用频率响应扣除法提取有源区本征响应的仿真新方法,简单地将封装网络、夹具及光探测仪器对频响的影响去除,用该方法对实验样品的高频调制响应进行了仿真,仿真结果与实际测量数据相吻合。这种方法可以拓展应用于不同类型调制器的本征频响的获得。

参 考 文 献

1 Tatemi Ido, Shigehisa Tanaka, Makoto Suzuki *et al.*. Ultra-high-speed multiple-quantum-well (MQW) electro-absorption (EA) optical modulators with integrated waveguides [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(9): 2026~2034

2 Yang Yanfu, Lou Caiyun, Gao Yizhi. Demonstration of a 16×10 -Gb/s OTDM system[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 264~266

3 G. L. Li, P. K. L. Yu. Optical Intensity Modulators for Digital and Analog Applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(9): 2010~2030

4 Nadir Dagli. Wide-Bandwidth Lasers and Modulators for RF Photonics[J]. *IEEE Trans Microwave Theory Tech.*, 1999, **47**(7): 1151~1171

5 Zhang Shangjian, Liu Yu, Zhang Shengli *et al.*. New simulation method for small-signal modulation response of laser with parasitic network[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 676~680

张尚剑,刘宇,祝宁华等.含寄生网络的激光器小信号调制响应模拟新方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 676~680

6 Liu Jian, Hu Yonghong, Zhang Shangjian *et al.*. Frequency response measurement of semiconductor optical amplifiers based on direct-subtracting method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 871~874

刘戡,胡永红,张尚剑等.直接扣除法测量半导体光放大器频率响应[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 871~874

7 Daniel Tauber, John E. Bowers. Dynamics of wide bandwidth semiconductor lasers [J]. *International Journal of Speed Electronics and Systems*, 1997, (8): 377~416

8 Y. Kim, H. Lee, J. Lee *et al.*. Chirp characteristics of 10-Gb/s electroabsorption modulator integrated DFB lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(8): 900~908

9 P. Dibie, L. Martens. Correction technique for on-chip modulation response measurements of optoelectronic devices[J]. *IEEE Trans Micro Theory Technol*, 1995, **43**(6): 1264~1269

10 Z. Y. Chen, Y. L. Wang, N. H. Zhu. Two-port calibration of the test fixtures with different test ports[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2002, **35**(4): 299~302