

# 超高速行波电吸收调制器的 $k$ 值设计方法\*

傅思镜 童洲森 刘叶新 邓 莉 林位株

(中山大学理工学院光电材料国家重点实验室, 广州 510275)

**摘要** 介绍了一种用于超高速行波电吸收调制器(TW-EAM)设计的“ $k$ 值带宽法”, 该方法考虑了影响调制器带宽的阻抗失配、相速度失配、微波衰减等因素, 说明一个优化设计的 TW-EAM 其带宽可达到 140 GHz.

**关键词** 行波电吸收调制器(TW-EAM); 调制带宽; 共面波导

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A

## 0 引言

一个有源波导短至  $63 \mu\text{m}$  带宽 50 GHz 的集总型电吸收调制器(L-EAM)在国外已有报道<sup>[1]</sup>. 然而短的波导长度影响调制效率. 行波型电吸收调制器(TW-EAM)将其电容分布在器件上, 克服了 L-EAM 电阻-电容(RC)对带宽的限制, 允许有更长的调制长度以增加调制效率而保持大的带宽.  $200 \mu\text{m}$  长 50 GHz 光带宽( $\sim 30$  GHz 电带宽)的 TW-EAM 在国外亦已有报道<sup>[2]</sup>. 实际上寻求调制电带宽大于 50 GHz 而调制性能比 L-EAM 好得多的高速 TW-EAM 是完全可能的. 为此, 直至上世纪 90 年代中期, 人们做了大量探索研究工作, 对调制器进行改良设计. 不过这些常规的办法往往只能顾及 TW-EAM 某一方面工作状况改善, 或采取折衷办法兼顾另一二方面, 效果都不好. 所以, 体现 TW-EAM 整体性能的带宽等技术指标一直没有一个较大幅度的提高. 包括行波型光调制器, 带宽均停留在 40 多 GHz 以下<sup>[3]</sup>.

1999 年 G. L. Li 等人提出了超高速 TW-EAM 设计的准则(或方针)——归一化的射频链路频率响应公式<sup>[6]</sup>. 该公式包括了阻抗失配、速度失配、和微波衰减等效应的综合影响. 我们首先运用反映行波电极分布、电极结构(如间隔、宽度等)、电极材料和波导有效折射率等参量来计算其射频(RF)链路增益  $G$ . 由归一化射频链路增益  $G$  与微波频率响应关系曲线求出相应的 3 dB 带宽. 这个计算过程称之为“ $k$ 值带宽法”. 其本质上是优化设计过程, 因为它综合考虑了多种因素对 TW-EAM 带宽的影响. 用  $k$  值带宽法设计的 GaAs/GaAlAs 多量子阱的共面波导型行波电吸收调制器, 在众多参数选择比较

理想的情况下带宽可达 140 多 GHz.

## 1 $k$ 值带宽法相关参数的计算

如果按照电极的分布及形状来区分, TW-EAM 的电极种类通常有: 两无限宽电极、两对称有限宽电极(平行场结构)、共面波导、非对称两电极等四种. 应用得比较多的是平行场结构和共面波导这两类. 图 1 和图 2 分别是这两种电极分布的示意图.

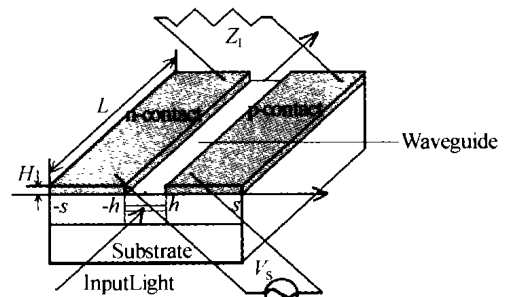


图 1 平行场结构的 TW-EAM  
Fig. 1 A TW-EAM of parallel field structure

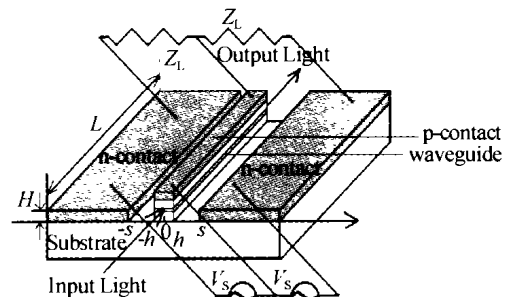


图 2 共面波导结构的 TW-EAM  
Fig. 2 A TW-EAM of coplanar waveguide structure

行波电极实际上就是一种微波传输线<sup>[4,12]</sup>. 对于传输线, 有四个基本的物理参数, 它们是: 单位长度的串联电阻  $R_0$ , 单位长度的电容  $C_0$ , 单位长度的电感  $L_0$ , 单位长度的电导  $G_0$ .

通过保角变换和施瓦兹变换<sup>[3]</sup>, 把电极的位置变换成类似于典型电容的两平板, 使电力线一点不漏地进入到两平板之间, 避免了电容的边缘效应. 从而求出图 1 和图 2 相对应电容的表达式<sup>[3]</sup>

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{eff} K(k')}{K(k)} \quad (\text{平行场结构}) \quad (1)$$

\*国家自然科学基金资助项目(60178020, 10274107), 广东省自然科学基金资助项目(011204, 2002B11601)  
Tel: 020-84037027 Email: stfsj@zsu.edu.cn  
收稿日期: 2003-07-03

$$C_0 = \frac{4\varepsilon_0\varepsilon_{\text{eff}}K(k)}{K(k')} \quad (\text{共面波导}) \quad (2)$$

在图 1 和图 2 中,  $V_s$  为电极所加电压,  $k = h/s$  ( $k$  值的定义). 式中,  $k' = \sqrt{1-k^2}$ ,  $K(k)$ 、 $K(k')$  为第一类完全椭圆积分,  $\varepsilon_0$  为空气的介电常数,  $\varepsilon_{\text{eff}}$  为有效微波介电常数.  $\varepsilon_{\text{eff}}$  可由以下方法求出<sup>[5]</sup>:

$$\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}} = \sqrt{\varepsilon_q} + (\sqrt{\varepsilon_r} - \sqrt{\varepsilon_q}) / (1 + a(f/f_{\text{TE}})^{-1.8}) \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon_q = (\varepsilon_r + 1)/2$  为传输线有效介电常量的准静电值;  $f_{\text{TE}} = c/4h'\sqrt{\varepsilon_r - 1}$ , 是最低阶纵向模 TE1 模的截止频率;  $\varepsilon_r$  为衬底相对介电常数;  $h'$  为衬底厚度;  $c$  为真空中光速;  $a$  是与传输线结构参数有关的量, 由下式决定

$$\lg(a) \approx u \lg(s/w) + v \quad (4)$$

$$u \approx 0.54 - 0.64q + 0.015q^2 \quad (5)$$

$$v \approx 0.43 - 0.86q + 0.54q^2 \quad (6)$$

$$q = \lg(s/h') \quad (7)$$

其中  $s$  和  $w$  分别为金属电极层的宽度与间距.

从已算出的  $C_0$ , 可以根据以下公式算出以下参数<sup>[3]</sup>

电极传输线单位长度的电感

$$L_0 = \varepsilon_{\text{eff}}/C_0c^2 \quad (8)$$

介质材料的并联电导

$$G_0 = \omega C_0 \tan \delta \quad (9)$$

电极单位长度的电阻

$$R_0 = \frac{2R_m}{L} \sqrt{\frac{\omega}{W_s}} \quad (10)$$

式中  $c$  是光速,  $\omega$  是传播的微波角频率,  $\tan \delta$  是材料损耗的正切值,  $R_m$  是直流电阻,  $W_s$  是趋肤深度等于电极厚度一半的角频率, 趋肤深度  $\delta(\omega) = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$ . 式中  $\sigma$  为电导率,  $\mu$  为磁导率,  $L$  是电极的有效长度.

计算出这四个基本参数, 微波传输时的传输常数  $\gamma_\mu$  便可得到

$$\gamma_\mu = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \quad (11)$$

在高频近似条件下, 调制器的特征阻抗可以表示为

$$Z_m = \sqrt{L_0/C_0} \quad (12)$$

## 2 TW-EAM 的归一化射频链路频率响应

归一化射频链路增益 (Normalized Radio-Frequency Link Gain)<sup>[6]</sup>

$$G_{\text{NORM}} = \left| \frac{T}{1 - \Gamma_L \Gamma_S \exp(-2\gamma_\mu L)} \right| \left| \frac{\exp\{(j\beta_0 - \gamma_\mu)L\} - 1}{(j\beta_0 - \gamma_\mu)L} + \Gamma_L \exp(-2\gamma_\mu L) \frac{\exp\{(j\beta_0 + \gamma_\mu)L\} - 1}{(j\beta_0 + \gamma_\mu)L} \right|^2 \quad (13)$$

式中  $\beta_0 = \omega/v_0$ , ( $v_0$  为微波相速度) 式(13) 是归一化的 TW-EAM 频率响应, 它包含了阻抗失配, 速度失配和微波损耗等效应, 式中的  $\gamma_\mu$  和  $Z_m$  已由上面求出. 这个等式被用到以后的分析当中. 微波反射系数计算如下

$$\Gamma_S = (Z_S - Z_m)/(Z_S + Z_m) \quad (14)$$

$$\Gamma_L = (Z_L - Z_m)/(Z_L + Z_m) \quad (15)$$

另外  $T = 1 - \Gamma_S$ , 其中  $Z_S, Z_m, Z_L$  分别定义为源传输线, 调制器和终端的微波特征电阻.

## 3 “ $k$ 值带宽法” 计算实例

在以半绝缘 GaAs 介质作为衬底, 以 AlGaAs/GaAs MQWs 为波导, 电极材料为金 (Au) 的共面波导型 TW-EAM. 其中参数为:  $\varepsilon_{\text{eff}} = 12.87$ , 材料损耗角正切  $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ , 金的电阻率  $\rho_{\text{Au}} = 2.4 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ , 电导率  $\sigma_{\text{Au}} = 4.17 \cdot 10^7 \text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ , 波导宽度为  $3 \mu\text{m}$ . 我们设中间电极宽度为  $5 \mu\text{m}$ , 电极厚度为  $2 \mu\text{m}$ , 源传输线和终端的阻抗  $Z_S = Z_L = 50 \Omega$ , 电极有效长度为  $300 \mu\text{m}$ .

根据式(2) 可以计算及作出电容  $C_0$  与  $k$  的关系图, 如图 3 所示.

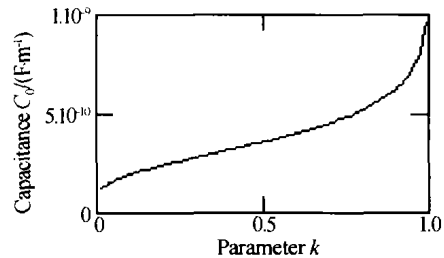


图 3 TW-EAM 的电容与参数  $k$  的关系曲线

Fig. 3 Capacitance of TW-EAM vs parameter  $k$

再把式(1) 和式(8) 代入式(12), 可以得到调制器特性阻抗  $Z_m$  关于  $k$  的表达式, 并可作出  $Z_m$  与  $k$  的关系图, 如图 4.

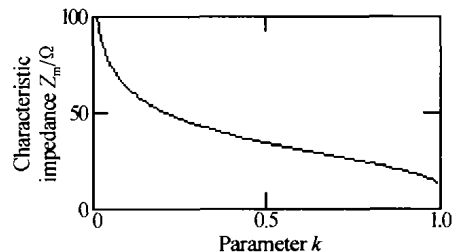


图 4 TW-EAM 的微波特性阻抗与参数  $k$  的关系曲线

Fig. 4 Microwave characteristic impedance of TW-EAM vs parameter  $k$

由于考虑到阻抗匹配的问题, 在理想情况下选取  $k$  值时, 选择  $Z_m = 50 \Omega$  所对应的  $k = 0.199$ . 则所对应的电容  $C_0 = 0.24 \text{ pF/mm}$ , 电感  $L_0 = 0.60 \text{ nH/mm}$  由电极宽度  $2h = 5 \mu\text{m}$ , 则电极间距  $x = s - h = 10.1 \mu\text{m}$ , 即可求出传输常数  $\gamma_\mu$  (在微波  $100 \text{ GHz}$ ,  $k = 0.199$  下的值为  $18.965 + 7.586i \text{E} + 3$ ). 进而画出 TW-

EAM 的归一化链路射频增益与微波频率的关系曲线,如图 5 所示.

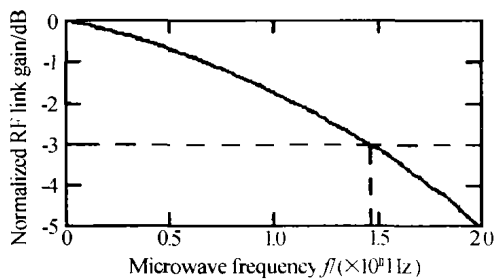


图 5 TW-EAM 的归一化链路射频增益与微波频率的关系曲线

Fig. 5 Normalized RF link gain of TW-EAM vs microwave frequency

图 5 表明,在设计中的共面波导型 TW-EAM 的 3 dB 带宽可达到 140 GHz 左右. 这是损耗限制下的调制带宽,与器件的有效长度和器件单位有效长度的损耗等密切相关.

运用“ $k$  值带宽法”计算实际中的行波电吸收调制器的带宽. 在文献[7]中,其实实验测得带宽为 40 GHz;运用文中提供的数据,用“ $k$  值带宽法”算出的带宽为 38 GHz. 在文献[8]中,终端负载阻抗为  $32\ \Omega$  和  $50\ \Omega$  时,实验测得的带宽为 24.5 GHz 和 13.4 GHz,用“ $k$  值带宽法”算出对应的带宽为 19 GHz 和 11.7 GHz. 可见,本方法的计算结果与实验测得的结果贴近. 验证了它的正确性和可行性.

S. Imscher 等人研究了电极宽度对 TW-EAM 性能的影响<sup>[9]</sup>. 发现宽的电极能减小微波损耗和速度失配,且调制带宽有  $> 100$  GHz 的势头.“ $k$  值带宽法”涉及到的理论计算公式和实验测量数据相对较多. 它不但涉及到 TW-EAM 的电极,还涉及到波导结构(由有效介电常数因子  $\epsilon_{\text{eff}}$  等来表征). 这是它复杂、困难的一面;又是它严格、综合力强的一面. 它不但考虑电极宽度的影响,也考虑电极分布、电极结构(包括间隔、宽度及厚度等)、电极材料等因素的影响. S. Imscher 等人的发现,正好从一个侧面支持了“ $k$  值带宽法”.

#### 4 工艺难点及解决方案探讨

国内制作优化设计后大带宽的 TW-EAM 会遇到不少有待解决的困难,下面对一些比较明显的难点及其解决方案作扼要的探讨.

1) 用  $k$  值法分析的是理想的矩形波导. 而采取湿法刻蚀,如化学腐蚀方法,一般只能得到  $60 \sim 70^\circ$  左右的梯形波导. 采取干法刻蚀,如反应离子刻蚀方法<sup>[10,11]</sup> RIE (Reactive Ion Etching),则可以达到  $85^\circ$  的梯形波导,接近理想情况的矩形波导.

2) 优化设计后的行波型调制器结构,将采用深

蚀刻的方法制作光波导. 因此,控制蚀刻的深度也是一个难点. 如果用上面提到的 RIE 方法,采用 He-Ne 激光监控的办法,则可以把蚀刻深度控制在  $0.1\ \mu\text{m}$  的精度. 只要在设计芯片结构时,把  $n$  型接触层的厚度设计好(一般在  $0.2\ \mu\text{m}$  范围),对于深蚀刻方法  $0.1\ \mu\text{m}$  的精度应该是允许的. 对波导的影响不大.

3) 在优化的  $3\ \mu\text{m}$  宽、 $300\ \mu\text{m}$  长的波导上镀电极以及电极的引线也是一个难点. 可以采用搭桥的办法把波导上的电极引出,以便压焊.

#### 5 结论

$k$  值带宽法,它综合考虑了阻抗失配、速度失配和微波损耗等效应对 TW-EAM 带宽的影响;它比传统的电极设计方法更全面、更合理地解决了超高速 TW-EAM 电极设计困难;是设计超高速 TW-EAM 电极的有效、简便、快速的好方法. 它揭示了 TW-EAM 具有大的带宽. 它为实验研究提供了具体方向.

#### 参考文献

- 1 Ido T, Tanaka S, Suzuki M, et al. Ultra-high-speed multiple-quantum-well electro-absorption modulators with integrated waveguides. *J Lightwave Technol*, 1996, **14**(9): 2026 ~ 2034
- 2 Kawano K, Kohtoku M, Ueki M, et al. Polarization-insensitive traveling-wave electrode electroabsorption (TW-EA) modulator with bandwidth over 50 GHz driving voltage less than 2 V. *Electron Lett*, 1997, **33**(18): 1580 ~ 1581
- 3 陈福深. 集成电光调制理论与技术. 北京:国防工业出版社, 1995. 68 ~ 80, 109 ~ 150  
Chen F S. Integrated Electrooptic Modulation Theory and Technology. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. 68 ~ 80, 109 ~ 150
- 4 郭冰,文锦辉,林位株. 光激发共面微带传输线色散与衰减特性. 红外与毫米波学报, 2000, **19**(2): 98 ~ 104  
Guo B, Wen J H, Lin W Z. *J Infrared and Millim Waves*, 2000, **19**(2): 98 ~ 104
- 5 Hasnain G, Dienes A, Whinnery J R. Dispersion of picosecond pulses on coplanar transmission lines. *IEEE Microwave Theory and Techniques*, 1986, **34**(6): 738 ~ 741
- 6 Li G L, Sun C K, Pappert S A. Ultrahigh-speed traveling-wave electroabsorption modulator-design and analysis. *IEEE Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(7): 1177 ~ 1183
- 7 Liao H H, Mei X B, Loi K K. Microwave structures for traveling-wave MQW electroabsorption modulators for wide band  $1.3\ \mu\text{m}$  photonic L inks. *Proc SPIE Optoelectronic Integrated Circuits*, 1997, **3006**: 291 ~ 300
- 8 Zhang Sheng Z, Chiu Yi-Jen, Abraham Patrick. 25 GHz Polarization-Insensitive electroabsorption modulators with traveling-Wave electrodes. *IEEE Photonics Technology*

- Letters, 1999, **11**(2): 191 ~ 193
- 9 Irmscher S, Lewen R, Eriksson U. Influence of electrode width on high-speed performance of traveling-wave electroabsorption modulators, *IPRM*, 2001, (13): 14 ~ 18
- 10 董小春, 杜春雷. 负性光刻胶刻蚀工艺研究. 光子学报, 2003, **32**(12): 1422 ~ 1425  
Dong X C, Du C L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1422 ~ 1425
- 11 曹召良, 陆广, 王吉增. 亚微米尺寸元件的离子束刻蚀制作. 光子学报, 2003, **32**(6): 653 ~ 656  
Cao Z L, Lu G, Wang J Z. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 653 ~ 656
- 12 郭冰, 文锦辉, 张海潮, 等. 共面微带传输线超短电脉冲传输特性. 光子学报, 2003, **29**(4): 312 ~ 316  
Guo B, Wen J H, Zhang H C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **29**(4): 312 ~ 316

## " $k$ Value" Method for Designing Ultrahigh-speed Traveling-wave Electroabsorption Modulator

Fu Sijing, Tong Zhousen, Liu Yexin, Deng Li, Lin Weizhu

State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology, Physics Science and Engineering College,  
Sun Yat-sen (Zhongshan) University, Guangzhou 510275

Received date: 2003-07-03

**Abstract** A " $k$  value" method for designing the ultrahigh-speed traveling-wave electroabsorption modulator (TW-EAM) is demonstrated. The phase velocity mismatch between the optical wave and the microwave, the impedance mismatch and the microwave loss of a TW-EAM are analyzed. As high as 140 GHz of 3 dB bandwidth of an optimized AlGaAs/GaAs TW-EAM is predicted.

**Keywords** Traveling-wave electroabsorption modulator (TW-EAM); Modulation bandwidth; Coplanar waveguide



**Fu Sijing** was born on October 1945, in Xingning City of Guangdong Province. He graduated from the Department of Physics at Sun Yat-sen University in 1969, he has been teaching at the department. As an associate professor and mentor of Master postgraduates at the College of Science and Engineering in the Sun Yat-sen University, in the past few years, he has published more than 20 papers focusing on education and research of optics and optical telecommunication.