

反射系数对行波调制器特性的影响¹

苟亚雄 李 英

(上海大学嘉定校区电子工程系 上海 201800)

摘 要 本文分析了当电极传输线与终端负载阻抗不匹配时, Ti: LiNbO₃ 行波调制器的调制特性。主要讨论了反射系数对调制器半波电压、带宽以及对时域波形的影响。

关键词 行波调制器, 半波电压, 冲激响应

中图分类号 TN761, TN252

1 引 言

Ti:LiNbO₃ 晶体集成光波导行波调制器的分析和设计越来越受到国内外学者的重视^[1,2]。但到目前为止, 几乎所有的分析都建立在行波调制电极与负载阻抗完全匹配的基础上, 从而保证电极上传输的是理想的行波。事实上, 由于制作的电极的特征阻抗受到加工工艺等因素的影响, 并不能与负载阻抗之间保持理想的匹配, 而是在负载端存在一定的反射。这将影响电极上调制波的特性, 从而影响到调制器的频率特性和时域特性, 本文从传输线理论出发, 对这种影响进行了详细的分析。

2 理论分析和数值讨论

行波调制器的结构如图 1 所示, 其中光波导和微波的相互作用长度为 L , 信号源电压 V_g , 信号源内阻 R_g , 负载阻抗 R_L , 电极传输线的特征阻抗为 Z_c 。由传输线理论可知, 电极上调制电压的分布是行驻波状态, 它可表示为^[3]

$$V(z) = \frac{V_g Z_c}{Z_c + R_g} \cdot \frac{1}{1 - \Gamma \Gamma_g e^{-2\gamma L}} [e^{-\gamma z} + \Gamma e^{-2\gamma L} e^{\gamma z}], \quad (1)$$

其中 Γ, Γ_g 分别为负载端和源端的反射系数: $\Gamma = (R_L - Z_c)/(R_L + Z_c)$, $\Gamma_g = (R_g - Z_c)/(R_g + Z_c)$, γ 为调制波传播常数: $\gamma = \alpha + j\beta_m = \alpha + j\omega_m N_m/c$, α 为损耗因子, β_m 为调制波的相移因子, N_m 为调制波的有效折射率。在分析中, 我们假设源端与传输线匹配, 即 $R_g = Z_c, \Gamma_g = 0$; 且不计传输线损耗。

¹ 1995-05-15 收到, 1997-03-21 定稿
东南大学毫米波国家重点实验室资助项目

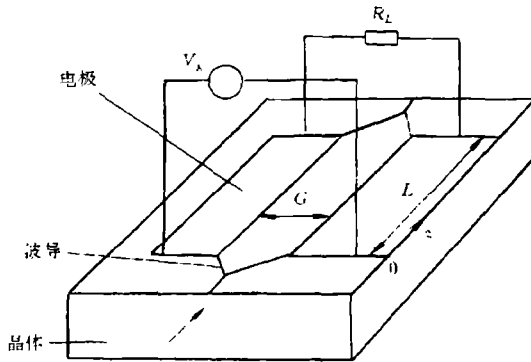


图1 行波调制器的结构

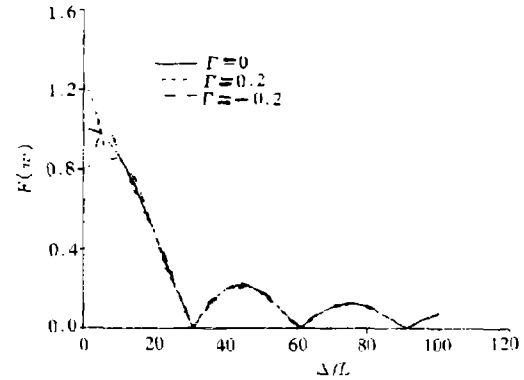


图2 调制器的频率特性

在时刻 t_0 进入调制器的光子行进到位置 z 处，作用在其上的电压可表示为^[4]

$$V(z, t_0) = (V_g/2) \cdot e^{j\omega_m t_0} [e^{-j\omega_m(N_m - N_0)z/c} + \Gamma e^{-j2\omega_m(N_m L)/c} \cdot e^{j\omega_m(N_m + N_0)z/c}]. \quad (2)$$

光波通过长度为 L 的调制器产生的相位延迟可由下式计算：

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{\pi}{\lambda_0} N_0^3 \gamma_{33} V_g \frac{\Gamma_i}{G} \int_0^L V(z, t_0) dz = \Delta\beta_0 L |F(\omega)|, \\ \Delta\beta_0 L &= (\pi/\lambda_0) N_0^3 \gamma_{33} V_g (\Gamma_i/G) L, \\ |F(\omega)| &= \left[\frac{\sin^2\left(\frac{\omega_m}{2} \frac{N_m - N_0}{c} L\right)}{\left(\frac{\omega_m}{2} \frac{N_m - N_0}{c} L\right)^2} + \Gamma^2 \frac{\sin^2\left(\frac{\omega_m}{2} \frac{N_m + N_0}{c} L\right)}{\left(\frac{\omega_m}{2} \frac{N_m + N_0}{c} L\right)^2} \right. \\ &\quad \left. + 2\Gamma_i \cos\left(\omega_m \frac{N_m}{c} L\right) \frac{\sin^2\left(\frac{\omega_m}{2} \frac{N_m - N_0}{c} L\right) \sin^2\left(\frac{\omega_m}{2} \frac{N_m + N_0}{c} L\right)}{\left(\frac{\omega_m}{2} \frac{N_m - N_0}{c} L\right) \left(\frac{\omega_m}{2} \frac{N_m + N_0}{c} L\right)} \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 Γ_i 为重叠积分因子， N_0 为光波有效折射率， λ_0 为光波波长， γ_{33} 为 LiNbO_3 晶体最大电光系数。

微波和光波有效折射率分别取为 4.2 和 2.2 在不同反射系数时可计算调制器频率响应，如图 2 所示。由计算结果可知，当负载与传输线匹配时，频率响应较平坦；当存在反射时，频率响应波动较大。从图中还发现，在直流时，反射系数对相位延迟的影响较大，当 $\Gamma > 0$ 时，延迟量增加；反之，延迟量减小。这说明直流时的半波电压将受反射系数的影响。下面我们分析直流时反射系数和半波电压的关系。

当频率趋于零时，由 (3) 式可得

$$\Delta\phi|_{f=0} = \Delta\beta_0 L(1 + \Gamma) = \pi V/V_\pi, \quad (4)$$

其中 V_π 为直流时的半波电压： $V_\pi = \lambda_0 G / [N_0^3 \gamma_{33} \Gamma_i (1 + \Gamma) L]$ 。记 $V_{\pi 0} = \lambda_0 G / (N_0^3 \gamma_{33} \Gamma_i L)$ 为无反射时的半波电压，则

$$V_\pi = V_{\pi 0} / (1 + \Gamma), \quad (5)$$

由 (5) 式可见，当反射系数大于零时，半波电压降低，从而在相同的驱动电压下相位延迟增大；反之，相位延迟减小。图 3 给出了参量 $V_\pi \cdot L$ 与反射系数 Γ 的关系曲线。

从图 2 可见, 当反射系数大于零时, 调制器的中心频率在直流处, 亦即相同的驱动电压下, 在直流时相位延迟最大; 反之, 调制器的中心频率不位于直流处, 存在一定的漂移. 同时, 从图 2 还可发现, 虽然反射系数存在时, 频率响应波动较大, 但当反射系数较小时, 对响应曲线变化趋势的影响并不大, 这说明当反射系数较小时, 它对带宽的影响也较小. 图 4 给出了带宽长度积与反射系数的关系曲线. 这里我们定义相位延迟降低到最大值的一半时的频率为带宽. 从图 4 显然可见, 当 $\Gamma > 0$ 时, 反射系数对带宽的影响较明显, 当 $|\Gamma| < 0.4$ 时, 反射系数对带宽的影响较小.

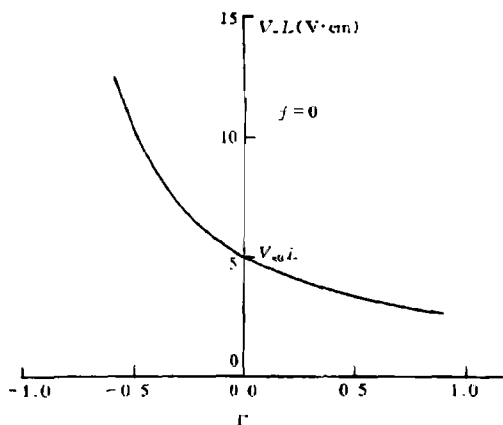


图 3 半波电压长度积随反射系数的变化

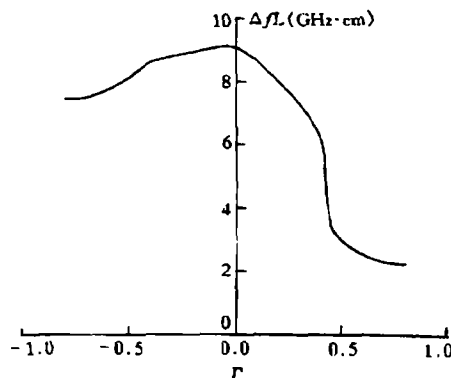


图 4 带宽长度积随反射系数的变化

反射系数的存在不仅对调制器的频率特性有一定的影响, 而且对调制器的时域特性也有影响. 下面我们用频域变换法分析反射系数对冲激响应的影响. (3) 式可变形为

$$\Delta\phi = V_g H(\omega) = V_g (\pi/\lambda_0) N_0^3 \gamma_{33} (\Gamma_i/G) L [\text{Re}(\Delta\phi') + j\text{Im}(\Delta\phi')], \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \text{Re}(\Delta\phi') &= \frac{\sin u}{u} + \Gamma \left[\frac{\sin v}{v} \cos w + \frac{1 - \cos v}{v} \sin w \right], \\ \text{Im}(\Delta\phi') &= \frac{\cos u - 1}{u} + \Gamma \left[\frac{1 - \cos v}{v} \cos w - \frac{\sin v}{v} \sin w \right], \\ u &= \omega_m (N_m - N_0) L/c, \quad v = \omega_m (N_m - N_0) L/c, \quad w = 2\omega_m (N_m/c) L, \end{aligned}$$

式中 $H(\omega)$ 为系统的频域传递函数, 由信号和系统理论可知, 对 $H(\omega)$ 进行反变换即可得到系统冲激响应^[5].

$H(\omega)$ 可表示为

$$H(\omega) = (\pi/V_{\pi 0}) [\text{Re}(\Delta\phi') + j\text{Im}(\Delta\phi')], \quad (7)$$

图 5 是有反射时的冲激响应. 无反射时的冲激响应是脉冲宽度为 t_r 的矩形脉冲, $t_r = t_m - t_0 = (N_m - N_0)L/c$, 为光波和调制波的渡越时间差. 当存在反射时, 响应波形在时间上可分为两个不同幅度、不同脉宽的矩形脉冲的级联, 其中前者是脉宽为 t_r 的矩形脉冲, 它是无

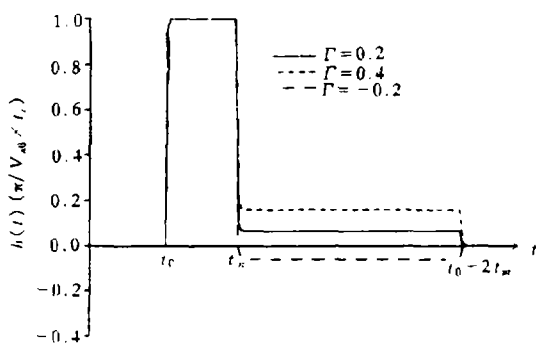


图 5 有反射时的冲激响应

反射时的理想冲激响应, 后者是脉宽为 $t_r' = t_m + t_0$ 、幅度较小的矩形脉冲, 它可以理解为调制波在终端受到反射后, 相对光波反方向传播到源端的响应波形, 因而其幅度随反射系数的变化而变化, 而脉宽是调制波和光波的相互作用时间 t_r' 。由此可见, 当存在反射时, 相位调制的冲激响应发生变化, 从而会对强度调制带来影响, 使调制器的时域响应波形产生失真。

3 结 论

本文分析了 Ti:LiNbO₃ 晶体行波调制器的终端反射系数对调制性能的影响。在频域中讨论了反射系数对半波电压和调制带宽的作用, 在时域中讨论了反射系数带来的冲激响应波形的变化。这对具体调制器的设计有一定的参考价值和指导意义。

参 考 文 献

- [1] Sueta T, Izutsu M. Integrated optic devices for microwave applications. IEEE Trans. on MTT, 1990, MTT-38(5): 477-482.
- [2] Kawano K. High-speed Ti:LiNbO₃ and semiconductor optical modulators. IEICE Trans., 1993, E76-C(2): 183-190.
- [3] 姚德森, 毛钧杰. 导行波技术基础. 湖南长沙: 国防科大出版社, 1987, 19-33.
- [4] Alferness R C. Waveguide electro-optic modulators. IEEE Trans. on MTT, 1982, MTT-30(8): 1121-1137.
- [5] Erasme D, et al. Time-domain analysis of phase-reversal travelling-wave integrated modulators. Electron. Lett., 1986, 22(19): 1024-1026.

EFFECT OF REFLECTION COEFFICIENT ON THE TRAVELING WAVE MODULATOR PERFORMANCES

Gou Yaxiong Li Ying

(Shanghai University, Shanghai 201800)

Abstract The characteristics of Ti: LiNbO₃ traveling wave modulator have been analyzed in this paper, taking into account the reflection coefficient of the terminator. The main emphasis of the present work is placed on the description of the effect of the reflection coefficient on the bandwidth, the half-wave voltage and the time domain response.

Key words Traveling wave modulator, Half-wave voltage, Impulse response

苟亚雄: 男, 1968 年生, 博士, 从事电磁散射、毫米波集成电路与光通信器件的研究。

李 英: 男, 1934 年生, 教授, 博士生导师, 从事导波光学与光信息传输理论的研究。