

悬置槽线行波相位调制器的特性分析*

苟亚雄 李 英

(上海大学电子工程系, 上海, 201800)

摘要 提出一种新颖的集成光波导行波相位调制器结构, 它利用悬置槽线作为调制器的外调制电路, 减小了光波和调制波之间的速度失配, 提高了相位调制器的调制带宽。采用谱域等效传输线法分析了悬置槽线的传播特性。

关键词 行波相位调制器, 悬置槽线, 谱域法。

引言

行波调制器因具有频带宽、稳定性好、能与单模光纤兼容等特点, 受到了普遍关注, 但由于调制波和光波之间固有的速度失配, 其调制带宽仍受到限制。我们提出了利用悬置槽线作为行波调制器外调制电路新结构, 并采用谱域等效传输线法对其特性进行了分析。

1 谱域分析

Y-切 LiNbO_3 晶体悬置槽线行波调制器的结构及坐标如图 1 所示, 它是在普通槽线调制器的底部以一定间距放置一接地金属平板。 LiNbO_3 晶体厚度为 h , 晶体与接地板的间距为 d , 槽宽为 W 。

考虑到晶体的各向异性, 采用一种简化的近似方法, 引进的晶体有效介电常数 ϵ_r 和有效厚度 h' 为:

$$\epsilon_r = \sqrt{\epsilon_x \cdot \epsilon_y}, \quad (1)$$

$$h' = \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} \cdot h; \quad (2)$$

其中 ϵ_x, ϵ_y 分别为晶体在 x 和 y 方向的相对介电常数。用厚度为 h' 的各向同性晶体代替原厚度为 h 的各向异性晶体, 这种静场近似已被证明是可以成立的^[1], 对 Y-切 LiNbO_3 晶体, $\epsilon_x = 28, \epsilon_y = 43$ 。

* 国家自然科学基金和东南大学毫米波国家重点实验室基金资助项目
本文 1995 年 1 月 3 日收到, 修改稿 1995 年 5 月 15 日收到

悬置槽线场结构是混合模式,可采用谱域等效传输线法求解.为了简化数值运算,槽线表面($y=b$)处电场基函数可选为

$$E_x = \frac{1}{\sqrt{(W/2)^2 - x^2}}, \quad |x| \leq W/2. \quad (3)$$

由于电场的 E_x 分量同 E_z 分量相比很小,可以忽略.

根据谱域中的迦辽金法,求解关于传播常数 k_z 的特征方程:

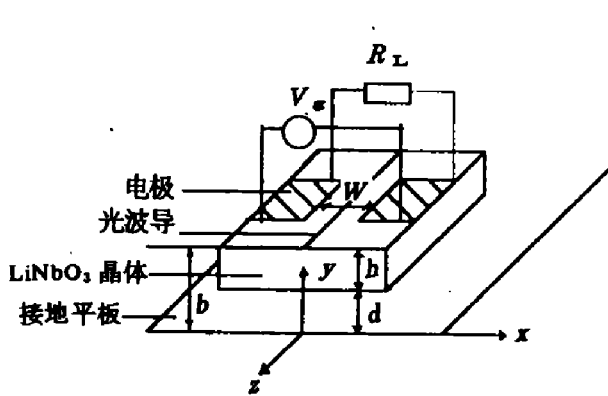


图 1 悬置槽线行波相位调制器结构图
Fig. 1 Structure of suspended slot line traveling wave phase modulator

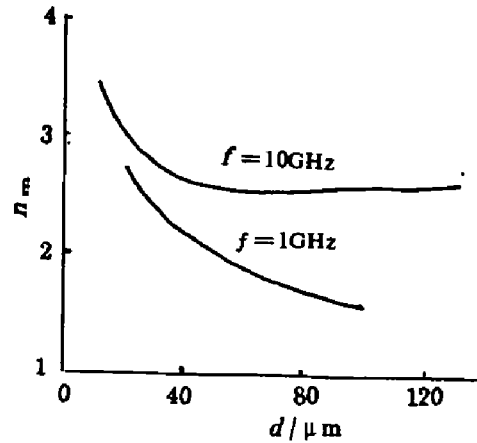


图 2 有效折射率随基底和接地板间距的变化曲线
Fig. 2 Effective refractive index as a function of spacing between the substrate and the ground plane

$$\int_0^{+\infty} J_0^2(W\alpha/2) \tilde{Y}_{xx}(\alpha, k_z) d\alpha = 0; \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{xx} = & \left(\frac{j\omega\epsilon_0}{\gamma_3} + \frac{j\omega\epsilon_0\epsilon_r}{\gamma_2} \frac{\gamma_2 + \epsilon_r\gamma_1 \tanh(\gamma_1 d) \tanh(\gamma_2 h')}{\epsilon_r\gamma_1 \tanh(\gamma_1 d) + \gamma_2 \tanh(\gamma_2 h')} \right) \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + k_z^2} \\ & + \left(\frac{\gamma_3}{j\omega\mu_0} + \frac{\gamma_2}{j\omega\mu_0} \frac{\gamma_1 + \gamma_2 \tanh(\gamma_1 d) \tanh(\gamma_2 h')}{\gamma_2 \tanh(\gamma_1 d) + \gamma_1 \tanh(\gamma_2 h')} \right) \frac{k_z^2}{\alpha^2 + k_z^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\gamma_1^2 = \gamma_3^2 = \alpha^2 + k_z^2 - k_0^2, \gamma_2^2 = \alpha^2 + k_z^2 - \epsilon_r k_0^2, k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0;$$

J_0 是第一类零阶贝塞尔函数.

求解该方程,可得传播常数的值,并可求得有效折射率 n_m 为:

$$n_m = k_z/k_0.$$

有效折射率已知后,则特征阻抗、重叠积分等参量都可方便地求解.

2 有效折射率和特征阻抗

当晶体厚度和槽宽分别选为 0.2mm 和 35 μ m 时,有效折射率随间距的变化规律如图 2

所示. 计算中分别取频率 $f=1\text{GHz}$ 和 $f=10\text{GHz}$. 从图 2 可见, 频率为 10GHz 时, 随着间距 d 的增加, 有效折率先降低而后增大. 如进一步增加 d 的范围可发现: 频率为 1GHz 时, 有效折射率的变化规律仍是先下降, 而后缓慢上升. 理论分析和数值计算均验证: 有效折射率增大的极限值正是普通槽线(即无接地金属板)的值.

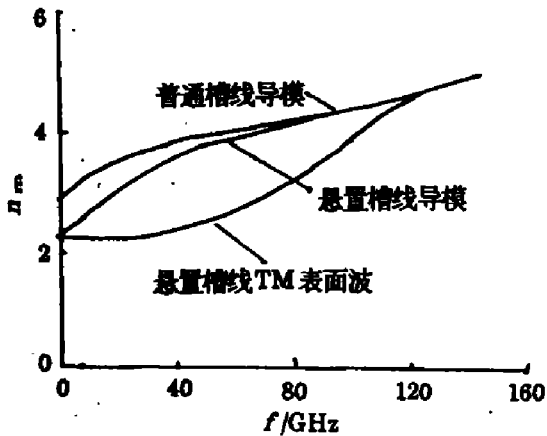


图 3 悬置槽线和普通槽线的色散曲线
Fig. 3 Dispersive curves of suspended slot line and conventional slot line

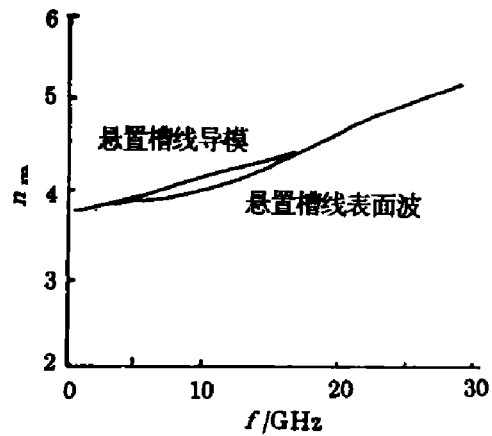


图 4 不同晶体厚度的悬置槽线的色散曲线
Fig. 4 Dispersive curve of suspended slot line for different thicknesses of substrate

由图 2 可知, 在低频端($f=1\text{GHz}$), 当间距 d 为 $36\mu\text{m}$ 时, 调制波有效折射率约等于光波有效折射率 n_0 . 以此时的 d 可计算悬置槽线的色散特性如图 3 所示. 为了同普通槽线作比较, 我们还计算了晶体厚度 h 为 0.2mm , 槽宽 W 为 $35\mu\text{m}$ 的普通槽线的色散曲线, 对比计算结果可知: 悬置槽线的有效折射率确实低于普通槽线, 因而能减小光波和调制波的速度失配, 增加带宽.

图 3 给出了悬置槽线的 TM 表面波色散特性, 从图 3 可见, 当高于一定频率时, 导模与表面波将发生耦合, 这表明传播的能量将以表面波的形式产生泄漏. 不改变其它参数, 我们取晶体厚度 $h=1\text{mm}$, 计算了悬置槽线的导模和表面波的色散特性(见图 4), 对比图 3 和图 4 可看到: 能量以表面波形式发生泄漏的频率随着晶体厚度的增加而降低, 所以在调制器的设计中, 晶体的厚度不宜选得过厚.

悬置槽线传输的是混合模, 可按照电压-功率关系定义特征阻抗为

$$Z_c = \frac{V^2}{2P}, \quad (6)$$

式(6)中 V 为槽间的峰值电压, P 是悬置槽线传输的总功率流.

图 5 和图 6 给出了特征阻抗随频率和间距 d 的变化曲线. 图 5 表明: 当间距 d 固定时($d=36\mu\text{m}$)随着频率升高, 特征阻抗也随之增大; 而且在通常的工作频带内, 悬置槽线的特征阻抗低于 50Ω , 所以调制器的负载阻抗不宜选用常规的 50Ω 值. 图 6 表明: 当频率 f 固定时($f=10\text{GHz}$), 随着 d 的增加, 特征阻抗显著提高, 但增加一定值后, 这种变化趋于缓慢.

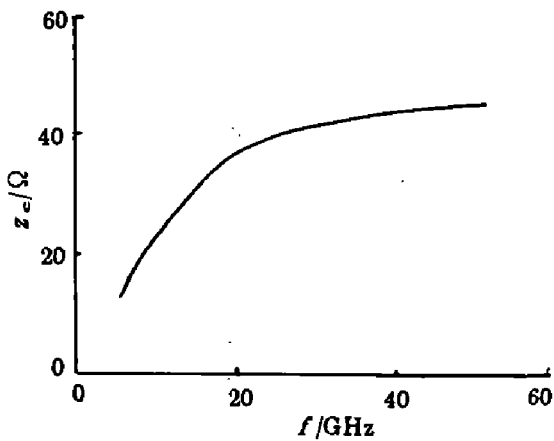


图 5 特征阻抗随频率的变化曲线
Fig. 5 Characteristic impedance
as a function of frequency

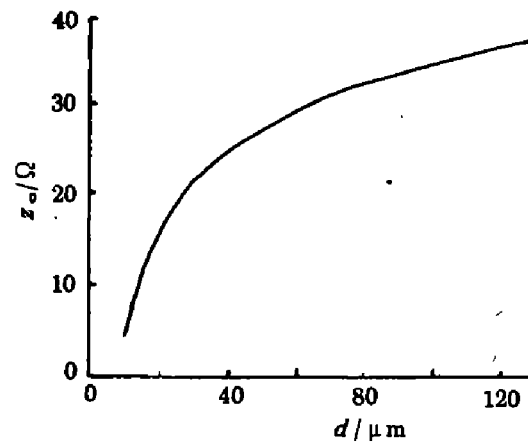


图 6 特征阻抗随基底和接地板间距的变化曲线
Fig. 6 Characteristic impedance as a function of
spacing between the substrate and the ground plane

3 场分布和重叠积分

外加调制场分布可由下式计算:

$$E_x(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}_x(\alpha, y) e^{j\alpha x} d\alpha. \quad (7)$$

归一化光场分布为^[2]:

$$E_0^2(x, y) = \frac{4(y-b)^2}{w_x w_y^3 \pi} \exp\left[-\left(\frac{x-a}{w_x}\right)^2 - \left(\frac{y-b}{w_y}\right)^2\right]; \quad (8)$$

式中 $2w_x$ 和 $2w_y$ 分别为光波导在 x, y 方向的宽度, a 是波导中心点的水平位置. 由此我们可计算 Y-切 LiNbO_3 晶体行波调制器的重叠积分为

$$\Gamma = \frac{W}{V} \iint E_0^2(x, y) E_x(x, y) dx dy. \quad (9)$$

假设光波导宽度 $2w_x = 4\mu\text{m}$, $2w_y = 2\mu\text{m}$, 当槽宽为 $35\mu\text{m}$ 时, 可计算重叠积分 Γ 随位置 a 变化的曲线如图 7 所示. 由图 7 可见: 重叠积分的最大值出现在槽的边缘, 这是由于调制电场在此处呈峰值. 我们知道: 当 LiNbO_3 晶体的切向为 Y-切时, 重叠积分的最大值出现在槽的中心位置, 但由于假设金属电极为无限薄, 槽口处的电场基函数取为式(3), 该式在 $x=W/2$ 处具有奇异性, 所以在计算调制电场和重叠积分时, 峰值便出现在槽的边缘处. 从文献[3]可以发现: 电极无限薄的假设虽然会对电场和重叠积分的计算带来一定的误差, 但对有效介电常数、特征阻抗等参数的影响却很小, 所以这种分析方法仍然是有效的.

4 频率响应

悬置槽线行波调制器的相对相位延迟为

$$\Delta\phi_m(f) = \frac{\pi}{\lambda_0} n_0^3 \gamma_{33} \Gamma \frac{VL \sin u}{W u}, \quad (10)$$

式(10)中, $u = \pi f L \frac{n_m - n_0}{c}$, λ_0 为光波波长, n_0 为光波折射率, γ_{33} 为 LiNbO_3 晶体的最大电光系数, L 为光波与调制波相互作用长度.

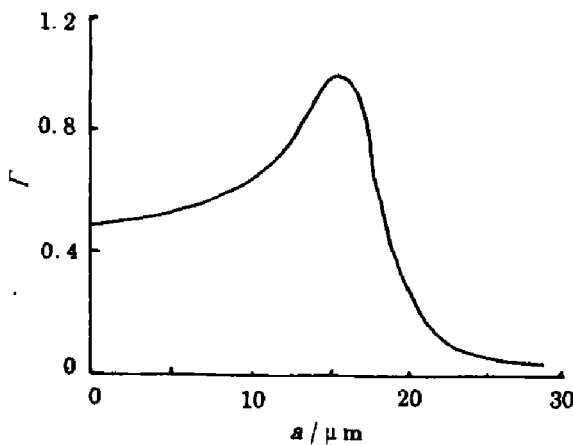


图7 重叠积分随光波导水平位置变化的曲线
Fig. 7 Overlap integration as a function of the horizontal position of the optical waveguide

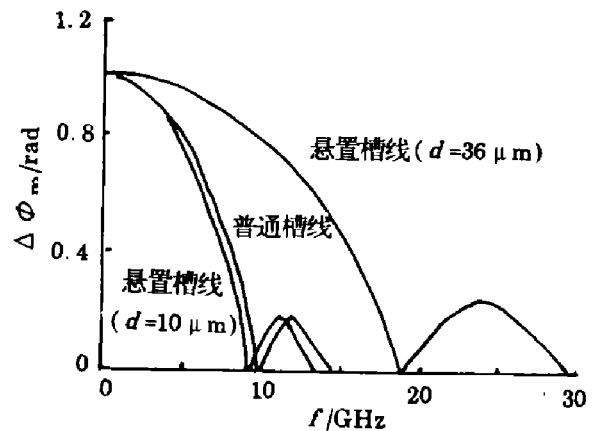


图8 调制器的频率响应曲线
Fig. 8 Frequency response of the modulator

在行波调制器中,若将 $\Delta\phi(f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta\phi|_{f=f_0}$ 处的频率宽度定义为 3dB 带宽,则

$$\Delta f = \frac{1.4c}{\pi(n_m - n_0)L}; \quad (11)$$

由式(11)可见:在行波工作中,带宽由光波和调制波通过器件的渡越时间差决定,若两者的速度一致(匹配),在忽略色散时,带宽没有限制.事实上,失配总有存在的,当光波和调制波的相互作用长度固定后,决定带宽的因素就是两者的有效折射率之差.由上述分析可见,适当调节晶体和接地板的距离,可使悬置槽线的有效折射率比普通槽线低,更接近于光波的折射率,因而调制器的带宽将会升高.

在计算中光波导置于槽的中心,并假定悬置槽线和负载阻抗匹配.

取 $\lambda_0 = 1.32 \mu\text{m}$, $n_0 = 2.2$, $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{m/V}$, $L = 20 \text{mm}$.通过计算,我们知道调制器的半波电压为 7V.调制器的频率响应如图 8 所示.图 8 中分别取不同的间距 ($d = 10 \mu\text{m}$, $d = 36 \mu\text{m}$) 进行计算.为了比较,还给出了普通槽线相位调制器的频率响应曲线.我们看到:当 $d = 36 \mu\text{m}$ 时,调制器的 3dB 带宽为 12GHz; $d = 10 \mu\text{m}$ 时,带宽为 5.8GHz;而普通槽线调制器的 3dB 带宽为 6GHz.由此可见,适当调节间距 d ,采用悬置槽线行波相位调制器,其带宽将

超过普通槽线调制器。

5 结语

本文提出了采用悬置槽线作为 $Ti:LiNbO_3$ 集成光波导行波相位调制器的外调制电路的设想,并用谱域传输线法对该结构进行了分析,分析结果说明,它是提高调制带宽的有效途径。

参考文献

- 1 Szentkuti B T. *Electron. Lett*, 1976;12(25):672~673
- 2 Kim C M, Ramaswany R B. *J. Light. Tech*, 1989;7(7):1063~1070
- 3 Yoneyama T, Iwasaki T. *IEICE Tran. Electron*, 1993;E76-C(2):229~237
- 4 杨铨让. 毫米波传输线,北京:电子工业出版社,1986:82~88
- 5 周文表. 电子科学学刊,1983;7(2):152~157

CHARACTERISTIC ANALYSIS OF SUSPENDED SLOT LINE FOR TRAVELING WAVE OPTICAL PHASE MODULATOR *

Gou Yaxiong Li Ying

(Shanghai University, Jiading, Shanghai 201800, China)

Abstract A novel structure for integrated optical waveguide traveling wave phase modulator was presented. It makes use of the suspended slot line as the modulating circuit, and is capable of decreasing the mismatch between optical wave and modulating wave, so the bandwidth of the modulator can be greatly increased. The transmission characteristics of the suspended slot line were analyzed by using the spectral domain technique.

Key words traveling wave phase modulator, suspended slot line, spectral domain technique.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China and by the Millimeter-wave State Key Laboratory of Southeast University