

# 运动的非线性光波导传播特性研究

余保龙

(南开大学现代光学研究所 天津 300071)

王惠民 胡南琦

(河南大学物理系 开封 475001)

**摘要** 本文利用电磁场相对论变换方法,对运动的非线性平板光波导 TE 模的传播特性进行了研究,并将运动参照系与实验室参照系中的结果进行了比较.

**关键词** 光波导,非线性,传播特性,TE 模

## 1 引言

非线性介质光波导由于其在光通讯和光计算机等方面的应用,引起人们极大的兴趣<sup>[1,2]</sup>.由于介质的非线性效应,研究它的传播特性比较复杂,尤其是当光波导以某一种速度运动时,要在实验室参照系中直接研究其传播特性更是如此.本文采用一种新的方法即电磁场相对论变换方法,对运动的非线性介质平板光波导 TE 模的传播特性进行研究,避免了复杂的数学推导,从而使问题得到简化.

## 2 非线性介质光波导理论

为讨论问题简单起见,我们仅以非线性介质平板光波导为例,结构如图 1 所示.薄膜层和基层是线性介质层,折射率分别为  $N_1$  和  $N_2$ ;覆盖层是非线性介质层,折射率为  $N_3 = n_3 + \alpha |E_{3y}|^2$ ,其中  $\alpha$  是非线性系数.假设其沿  $z$  轴以均匀速度  $v$  相对于实验室参照系  $F$  运动.设  $F'$  是固定在光波导上的运动参照系.

对于  $F$  和  $F'$  两种参照系之间的关系,利用相对论变换公式<sup>[3]</sup>

$$x' = x, \quad (1)$$

$$y' = y, \quad (2)$$

$$z' = \gamma(z - vt), \quad (3)$$

$$t' = \gamma(t - vz/c^2), \quad (4)$$

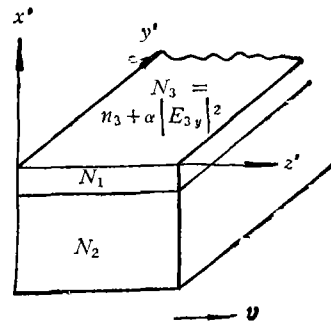


图 1

1993-12-06 收到,1994-05-24 定稿

余保龙 男,1964年生,博士生,从事低维材料和光电信息处理研究.

王惠民 男,1962年生,讲师,从事非线性光学器件研究.

胡南琦 男,1930年生,教授,从事非线性光学和微电子学研究.

其中  $\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ ,  $c$  为光在真空中的速度。于是可得到两种参照系中电磁场之间的变换关系:

$$E_x = \gamma(E'_x - vB'_y), \quad (5)$$

$$E_y = \gamma(E'_y + vB'_x), \quad (6)$$

$$E_z = E'_z; \quad (7)$$

$$B_x = \gamma(B'_x + v/c^2 E'_y), \quad (8)$$

$$B_y = \gamma(B'_y - v/c^2 E'_x), \quad (9)$$

$$B_z = B'_z. \quad (10)$$

对于 TE 模, 在  $F'$  参照系中, 已知  $E'_y$  方程<sup>[4]</sup>:

$$\nabla^2 E'_{iy}(x') - k_0^2 [N^2 - N_i^2 - \alpha |E'_{iy}|^2] E'_{iy}(x') = 0 \quad (11)$$

式中  $j = 1, 2, 3$  分别代表薄膜层、基底和覆盖层介质,  $N' = \beta'/k'$  为波导有效折射率。色散方程为

$$\tan(k'_i d) = \frac{k'_i [q' \tanh(q' x_1) + p']}{k_i'^2 - p' q' \tanh(q' x_1)}, \quad (N'^2 < N_i^2) \quad (12)$$

或

$$\tanh(k'_i d) = \frac{-k'_i [q' \tanh(q' x_1) + p']}{k_i'^2 + p' q' \tanh(q' x_1)}, \quad (N'^2 > N_i^2), \quad (13)$$

式中  $k_i'^2 = k_0^2 |N^2 - N_i^2|$ ,  $p'^2 = \beta'^2 - k_0^2 N_3^2$ ,  $q'^2 = \beta'^2 - k_0^2 N_3^2$ ,  $x_1$  是常数(介质 3 中场分布的峰值位置)。

有了这些已知结论, 再利用上述两种参照系中电磁场之间变换关系, 可得在  $F$  中非线性光波导传播特性的下述几个结论。

### 3 结论

**3.1**  $F$  中导波角频率和传播常数可以用  $F'$  中导波角频率和传播常数表示 因导波沿着  $z'$  方向传播, 且场在  $y'$  方向是均匀的, 故 TE 模电场可写为

$$E'_{iy}(x', z', t') = E'_{iy}(x') \exp[i(\omega' t' - \beta' z')]. \quad (14)$$

利用关系式:  $H'_{z'} = -\frac{\beta'}{\omega' \mu_0} E'_{y'}$ ,  $H'_{x'} = \frac{i}{\omega' \mu_0} \frac{\partial E'_{y'}}{\partial x'}$

由前面电磁场变换的关系式, 则有

$$\begin{aligned} E_y &= \gamma(E'_{iy} + vB'_{x'}) = \gamma(E'_{iy} + v\mu_0 H'_{x'}) = \gamma(1 - v\beta'/\omega') E'_{iy} \\ &= \gamma(1 - v\beta'/\omega') E'_{iy}(x') \exp[i(\omega' t' - \beta' z')] \\ &= \gamma(1 - v\beta'/\omega') E'_{iy}(x') \exp[i\gamma\omega'(t - vz/c^2) - i\gamma\beta'(z - vt)] \\ &= \gamma(1 - v\beta'/\omega') E'_{iy}(x') \exp\{i[(\gamma\omega' + v\gamma\beta')t \\ &\quad - (\gamma v\omega'/c^2 + \gamma\beta')z]\}. \end{aligned} \quad (15)$$

由此得到

$$\omega = \gamma(\omega' + v\beta'), \quad (16)$$

$$\beta = \gamma(\beta' + v\omega'/c^2). \quad (17)$$

通过简单的变换, 上式可改写为

$$\omega' = \beta(\omega - v\beta), \quad (18)$$

$$\beta' = \gamma(\beta - v\omega/c^2). \quad (19)$$

3.2 光波导传播模式不变 在  $F'$  中, 对 TE 模  $E' = (0, E'_y, 0)$ ,  $H' = (H'_x, 0, H'_z)$ , 利用电磁场变换关系式, 在  $F$  中仍有  $E = (0, E_y, 0)$ ,  $H = (H_x, 0, H_z)$ , 即在  $P$  中仍为 TE 模. 对 TM 模也可得到同样的结论.

3.3 在  $F$  中,  $E_y$  方程可以方便的导出 已知在  $F'$  中,  $E'_y$  方程为

$$\nabla^2 E'_{iy}(x') - k_0^2 [N_i^2 - N_i^2 - \alpha_i |E'_{iy}(x')|^2] E'_{iy}(x') = 0 \quad (20)$$

或者改写为

$$\nabla^2 E'_{iy}(x') - \{\beta'^2 - k_0^2 [N_i^2 - \alpha_i |E'_{iy}(x')|^2]\} E'_{iy}(x') = 0. \quad (20a)$$

将  $F'$  中的量变换到  $F$  中去, 可得到  $F$  中  $E_{iy}(x)$  的波动方程:

$$\nabla^2 E_{iy}(x) - \{\gamma^2(\beta - v\omega/c^2)^2 - (\gamma^2/c^2)(\omega - v\beta)^2 [N_i^2 - \alpha_i |E_{iy}(x)|^2 / [\gamma^2(1 - v\beta'/\omega')^2]]\} E_{iy}(x) = 0. \quad (21)$$

整理得

$$\begin{aligned} \nabla^2 E_{iy}(x) - \left\{ \gamma^2(\beta - v\omega/c^2) \right. \\ \left. - \frac{\gamma^2}{c^2} (\omega - v\beta)^2 \left[ N_i^2 - \alpha_i \frac{|E_{iy}(x)|^2}{\gamma^2(c\beta - v\omega)[c^2\beta(1 + v^2) - \omega v(1 + c^2)]} \right] \right\} \\ \times E_{iy}(x) = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

如果从 Maxwell 方程出发在  $F$  中也可直接得到此方程, 但推导过程的复杂程度要远大于此.

另外, 通过类似的讨论还可以得到非线性光波导的色散方程不变等特性.

上述对运动的非线性光波导传播特性的研究避免了复杂的数学运算, 物理概念清楚. 此方法对其它任何形式的运动光波导传播特性的研究都是成立的, 因而可望推广.

### 参 考 文 献

- [1] Seaton C T, *et al.* Opt. Eng., 1985, 24(4):593—599.
- [2] Seaton C T, Valera J D, George S. IEEE J. of QE, 1985, QE-21(7):774—782.
- [3] Rosser W G V. Classical Electromagnetism via Relativity, New York: Plenum, 1968, 157.
- [4] 方俊鑫, 等编著. 光波导技术物理基础. 上海: 上海交通大学出版社, 1988, 180—185.

## STUDY OF PROPAGATION BEHAVIORS OF NONLINEAR SLAB OPTICAL WAVEGUIDE IN MOVING

Yu Baolong

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

Wang Huimin Hu Nanqi

(Department of Physics, Henan University, Kaifeng 475001)

**Abstract** By using electromagnetism relativity transformation method, the propagation properties of EM mode of nonlinear slab optical waveguide in moving were studied. The results in moving reference system and in laboratory reference system were compared.

**Key words** Optical waveguide, Nonlinear, Propagation behaviors, TE mode